

APROVEITAMENTO DA ENERGIA DO MAR ATRAVÉS DO ESPRAIAMENTO DE ESTRUTURAS COSTEIRAS PORTUÁRIAS

PEDRO MIGUEL GOMES SILVA OLIVEIRA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Orientador: Professor Doutor Francisco Taveira Pinto

Coorientador: Engenheiro Tiago Morais

JULHO DE 2014

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2013/2014

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2013/2014 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Francisco Taveira Pinto, pelos conselhos e conhecimentos que me transmitiu ao longo do trabalho. Gostaria também de agradecer ao coorientador Engenheiro Tiago Morais pelo tempo dedicado a esta dissertação, por ter disponibilizado os meios necessários à realização desta investigação e pelas suas ideias que muito contribuíram para o resultado final.

Agradecer a disponibilidade e interesse dos meus colegas do INEGI (Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial), Rui Teixeira e João Ferreira, que muito me ajudaram na resolução de problemas e dúvidas, para além de me inspirarem bastante através das inúmeras discussões sobre o tema de estudo.

O meu obrigado à Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente pelos meios disponibilizados ao longo dos ensaios experimentais. A minha gratidão à unidade do Mar do INEGI pelo acolhimento durante todo o tempo de realização da dissertação e pela boa experiência que me proporcionou. A disponibilidade da Secção de Desenvolvimento do Produto e Sistemas do INEGI, em especial do José Costa pelo auxílio na execução do modelo.

Um obrigado às pessoas da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos que me auxiliaram na altura dos ensaios de laboratório, Professor Paulo Santos, Guilherme Paredes e D. Esmeralda Miguel.

Agradeço também aos professores pertencentes ao departamento de Engenharia Eletrotécnica, António Moreira e Fernando Guedes que me auxiliaram no desenvolvimento dos sistemas elétricos necessários para os ensaios.

Agradecer à minha Família que sempre me apoiou no decorrer deste trabalho.

Por fim agradecer a todos os meus amigos, em especial à Joana Santos que esteve sempre a meu lado e fez com que tudo fosse mais fácil.

RESUMO

A dependência por parte de toda a humanidade dos combustíveis fósseis, a sua utilização excessiva e os impactes negativos provocados pela utilização são questões que devem ser contrariadas para assegurar a sustentabilidade global. Para substituir a utilização excessiva de combustíveis fósseis é necessário desenvolver formas de aproveitamento de fontes de energia renováveis que permitam um desenvolvimento sustentado. Assim, na presente dissertação é apresentado um dispositivo de conversão da energia das ondas a ser incorporado em estruturas de defesa costeira ou portuárias assim como os trabalhos de investigação realizados e estudos levados a cabo para otimização e desenvolvimento do mesmo.

O dispositivo é baseado na tecnologia SSG (Sea-wave Slot-cone Generator) desenvolvida pela empresa WAVEenergy (Stavanger, Noruega) que tem vindo a ser investigada na Universidade de Aalborg. A tecnologia aproveita a energia presente nos eventos de galgamento provocados pelas ondas do mar nas estruturas costeiras.

O objetivo do presente trabalho é desenvolver um dispositivo de conversão de energia baseado na tecnologia SSG e otimizar a sua eficiência através do estudo de “concentradores” que concentram a energia das ondas incidentes provocando um aumento nos fenómenos de galgamento. O desenvolvimento do dispositivo e da sua otimização é realizado recorrendo à modelação física. Foram realizados ensaios no tanque de ondas da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente (SHRHA) da FEUP, a uma escala de 1:40 utilizando ondas regulares e irregulares.

Os resultados obtidos das experiências realizadas permitem por um lado conhecer a capacidade de absorção energética por parte do dispositivo em condições de mar típicas da costa Oeste portuguesa e, por outro lado a otimização da geometria da estrutura, com especial foco nas componentes idealizadas (concentradores).

PALAVRAS-CHAVE: energia das ondas, SSG (Sea-wave Slot-cone Generator), defesa costeira, galgamento.

ABSTRACT

The negative impacts caused by fossil fuels over the past decades on Earth and the high dependence of the same by all mankind are issues that must be countered to ensure global sustainability. To replace fossil fuels is necessary to develop ways of harnessing renewable energy to enable a sustainable development. Thus, in this study it's presented a device for converting wave energy to be incorporated into coastal defense structures as well as the research undertaken and studies carried out for optimization and development of it.

The device is based on SSG (Sea-wave Slot-cone Generator) technology developed by the company WAVEenergy (Stavanger, Norway) that have been investigated lately at Aalborg University. The technology harnesses the energy present in the event of overtopping caused by the waves on coastal structures.

The objective of this work is to develop a wave energy converter based on SSG technology and optimize its efficiency through the study of "concentrators" that concentrate the energy of the incident waves causing an increase in the phenomena of overtopping. The development of the device and its optimization was carried out using physical modeling. Tests were carried out in the wave tank at Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente (SHRHA), FEUP at a scale of 1:40 using both regular and irregular waves.

The results of the experiments allow in one hand to know the capacity of energy absorption by the device under typical conditions of sea of Portuguese west coast and on the other hand, the optimization of the geometry of the structure, with special focus on the optimization of idealized components (concentrators).

KEYWORDS: Wave energy, SSG (Sea-wave Slot-cone Generator), coastal defense, overtopping.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS.....	I
RESUMO.....	III
ABSTRATO.....	V

1. INTRODUÇÃO	1
2. ESTADO DA ARTE.....	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. DIFERENTES FORMAS DE ENERGIA MARINHA	5
2.2.1. ENERGIA EÓLICA	6
2.2.2. ENERGIA DAS MARÉS E CORRENTES OCEÂNICAS	6
2.2.3. ENERGIA DO GRADIENTE DE SALINIDADE.....	8
2.2.4. ENERGIA DE GRADIENTE TÉRMICO.....	8
2.2.5. ENERGIA SOLAR.....	9
2.2.6. MICROALGAS / MACROALGAS PARA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEL.....	9
2.2.7. ENERGIA DAS ONDAS.....	10
2.3. INTEGRAÇÃO DE SOLUÇÕES DE APROVEITAMENTO DA ENERGIA DAS ONDAS EM INFRAESTRUTURAS COSTEIRAS OU PORTUÁRIAS.....	11
2.3.1. FORMAS DE APROVEITAMENTO DA ENERGIA DAS ONDAS EM INFRAESTRUTURAS COSTEIRAS	12
2.3.2. SOLUÇÕES DE APROVEITAMENTO DE ENERGIA DAS ONDAS <i>ONSHORE</i> EXISTENTES OU EM FASE DE DESENVOLVIMENTO	14
2.3.2.1. Mutriku OWC Plant	14
2.3.2.2. LIMPET	17
2.3.2.3. OWC da ilha Pico.....	19
2.3.2.4. REWEC3 (Resonante Wave Energy Converter 3)	21
2.3.2.5. TAPCHAN.....	24
2.3.2.6. SSG – Kvitsøy, Noruega.....	24
2.3.2.7. SSG - Expansão do porto de Hanstholm, Dinamarca	27
2.3.2.8. Wavestar – Hanthstolm, Dinamarca	28
2.4. ANÁLISE TÉCNICO-ECONÓMICA DA INTEGRAÇÃO DE UM SISTEMA DE APROVEITAMENTO DE ENERGIA DAS ONDAS NUMA INFRAESTRUTURA COSTEIRA	30
2.5. SISTEMA SSG – SEA-WAVE SLOT-CONE GENERATOR	33
2.5.1. INTRODUÇÃO	33
2.5.2. COMPORTAMENTO HIDRÁULICO	34
2.5.2.1. Galgamento	34
2.5.2.2. A importância da maré.....	39
2.5.2.3. Comportamento em relação à reflexão	41
2.5.3. COMPORTAMENTO ESTRUTURAL	41
2.5.4. EFICIÊNCIA E PRODUÇÃO DE ENERGIA	41

2.5.5. POWER TAKE-OFF (PTO)	42
3. CASO DE ESTUDO	45
3.1. INTRODUÇÃO	45
3.2. MODELAÇÃO FÍSICA	45
3.2.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	45
3.2.2. EFEITOS DE ESCALA	47
3.3. INFRAESTRUTURA DE ENSAIOS	48
3.4. MODELO	49
3.5. INSTALAÇÃO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	54
3.5.1. INSTRUMENTAÇÃO	54
3.5.1.1. Sondas de níveis hidrodinâmicos	54
3.5.1.2. Sistema de medição de caudal	55
3.5.2. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL	57
3.5.3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	58
3.5.4. PRECISÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	59
3.6. PROGRAMA DE ENSAIOS	59
3.6.1. PROGRAMA DE ENSAIOS PRELIMINAR	61
3.6.2. PROGRAMA DE ENSAIOS COM ONDAS REGULARES	62
3.6.3. PROGRAMA DE ENSAIOS COM ONDAS IRREGULARES	64
3.7. RESULTADOS	66
3.7.1. PARÂMETROS PARA AVALIAÇÃO DO DISPOSITIVO	66
3.7.2. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	68
3.7.2.1. Resultados dos ensaios preliminares	69
3.7.2.2. Resultados dos ensaios com ondas regulares	71
3.7.2.3. Resultados dos ensaios com ondas irregulares	73
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	79
4.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
4.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	81
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
ANEXOS	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Consumos mundiais anuais de eletricidade [1].	1
Figura 2 - Evolução do consumo elétrico em Portugal [2].	2
Figura 3 – Capacidade instalada para as diferentes fontes de produção de eletricidade em Portugal [2].	2
Figura 4 - Evolução estimada da produção de eletricidade por fontes de energia renovável [6].	3
Figura 5 - Tipos de estrutura de suporte para implementação <i>offshore</i> [11].	7
Figura 6 - Tipo de tecnologias de conversão da energia das correntes das marés oceânicas [11].	8
Figura 7 - Imagem ilustrativa de uma ilha solar [9].	9
Figura 8 – Fluxo de energia médio anual global [9].	10
Figura 9 - Caracterização de alguns sistemas para aproveitamento de energia das ondas [11].	12
Figura 10 – Esquema representativo do funcionamento da coluna de água oscilante (OWC) [16].	13
Figura 11 – Esquema representativo do funcionamento dos dispositivos de <i>overtopping</i> [17].	13
Figura 12 – Esquema representativo da tecnologia <i>multibody</i> [19].	14
Figura 13 - Fotografia do quebramar de Mutriku com incorporação do grupo gerador de energia elétrica [21].	15
Figura 14 - Zona de localização dos grupos de extração de energia das ondas (pré-fabricada) [20].	16
Figura 15 – Colocação de uma dos elementos pré-fabricados [20].	16
Figura 16 – Funcionamento da central LIMPET 500 [22].	17
Figura 17 – Fotografia da parte de trás da estrutura [23].	18
Figura 18 – Parte posterior da central do Pico [25].	20
Figura 19 - Evolução das horas de produção e da energia produzida [26].	21
Figura 20 – Desenho esquemático do tradicional OWC e do U-OWC [14].	22
Figura 21 – Representação de uma vista 3D dos caixões REWEC3 [28].	23
Figura 22 – Desenho da secção transversal tipo dos caixões REWEC3 [29].	23
Figura 23 – Esquema representativo do funcionamento do Tapchan [31].	24
Figura 24 – Secção lateral de um dispositivo SSG com três níveis [13].	25
Figura 25 – Aplicação do SSG num quebramar [13].	25
Figura 26 – Esboço das principais dimensões do SSG [13].	26
Figura 27 - Secção final SSG de três níveis [34].	27
Figura 28 - Esquema do <i>Wavestar</i> em funcionamento [35].	28
Figura 29 - Protótipo <i>Wavestar</i> na posição de proteção contra tempestades [35].	29
Figura 30 – Divisão de custos de um dispositivo OWC, adaptado de [24].	31
Figura 31 – Esquema de projeto de uma estrutura com 3 níveis de reservatórios, [39].	34
Figura 32 – Caudal de galgamento em função da altura de onda significativa, [39].	35
Figura 33 – Efeito do nível da crista do reservatório no galgamento, [39].	36
Figura 34 – Efeito da profundidade da rampa no rácio de galgamento e na eficiência hidráulica, [39].	37
Figura 35 – Efeito do ângulo da rampa de aproximação na eficiência hidráulica (η_{Hyd}), [39].	37
Figura 36 – Tipos de rebentação de ondas na linha de costa, [39].	38
Figura 37 – Decréscimo da eficiência hidráulica com o aumento da variação da maré [39].	40
Figura 38 – Efeito do número de reservatórios na eficiência hidráulica, [39].	41
Figura 39 – <i>Multi-stage Turbine</i> com três níveis, [13].	43
Figura 40 – Vista em planta do tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da FEUP, [43].	49
Figura 41 - Geometria da secção de aproveitamento de energia em dimensões de modelo.	50
Figura 42 - Geometria das secções laterais do caixão em dimensões de modelo.	50

Figura 43 – Desenho da situação sem concentradores e das duas configurações com concentradores.	52
Figura 44 – Plantas dos diferentes ângulos dos concentradores com as medidas de modelo.	53
Figura 45 – Estruturação do modelo através do <i>software</i> SolidWorks.	53
Figura 46 – Fotografias do modelo construído; à esquerda a estrutura por inteiro; à direita o pormenor do dispositivo SSG.	53
Figura 47 – Sondas de nível grandes com maior amplitude de medição.	54
Figura 48 – Sondas de nível pequenas com menor amplitude de medição.	54
Figura 49 – Recipientes utilizados como reservatórios auxiliares.	55
Figura 50 – Sistema de controlo no nível de água nos reservatórios auxiliares.	56
Figura 51 – Bombas utilizadas na medição de caudal.	56
Figura 52 – Vista em planta do dispositivo experimental (medidas em metros).	57
Figura 53 – Fotografia da disposição experimental na proximidade da estrutura.	58
Figura 54 - Série temporal do nível de água nos três reservatórios (traduzido em V) para o ensaio 30C3_I1 ($H_s=0.75m$, $T_p=9.2s$ em dimensões do protótipo, Channel1≡Reservatório1, Channel2≡Reservatório2 e Channel7≡Reservatório3).	66
Figura 55 - Séries temporais dos níveis de água nos três reservatórios (traduzidos em V) para o ensaio 40C3_R6 ($H=2m$, $T=13.8s$ em dimensões do protótipo, Channel1≡Reservatório1, Channel2≡Reservatório2 e Channel7≡Reservatório3).	67
Figura 56 - Potência total em cada uma das combinações para os diferentes ensaios de ondas irregulares.	69
Figura 57 - Comparação entre a potência captada na configuração C2 e na configuração C3 para um ângulo de 30° dos concentradores.	70
Figura 58 - Comparação entre a potência captada na configuração C2 e na configuração C3 para um ângulo de 40° dos concentradores.	70
Figura 59 - Comparação entre a potência captada na configuração C2 e na configuração C3 para um ângulo de 50° dos concentradores.	70
Figura 60 - Caudal de galgamento nos três reservatórios para os diferentes estados de mar na combinação 0C1.	72
Figura 61 - Caudal de galgamento nos três reservatórios para os diferentes estados de mar na combinação 40C3.	72
Figura 62 - Potência total das diferentes configurações para os estados de mar ensaiados.	74
Figura 63 - Potência total do somatório dos estados de mar para as diferentes combinações.	74
Figura 64 - Eficiência hidráulica das combinações para os estados de mar ensaiados.	75
Figura 65 - Estimativa da energia anualmente produzida.	76

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Características de projeto do LIMPET 500, adaptado de [24].	18
Tabela 2 - Eficiências estimadas e medidas para as diferentes fases do processo de extração, adaptada de [24].	19
Tabela 3 - Características de projeto da central do Pico, adaptada de [24].	20
Tabela 4 - Eficiência parciais estimadas do dispositivo SSG [13].	26
Tabela 5 - Resumo da energia produzida desde a instalação (Setembro 2009) [36].	29
Tabela 6 - Tabela resumo de uma análise qualitativa entre as soluções apresentadas.	30
Tabela 7 - Rácio entre a “Produção Anual” e o “Investimento” total.	31
Tabela 8 - Caracterização qualitativa de cada uma das tecnologias [38].	32
Tabela 9 – Fatores de escala das diferentes variáveis consideradas nos ensaios.	47
Tabela 10 – Características das diferentes combinações de concentradores	52
Tabela 11 – Valores da largura de captura para os diferentes ângulos.	52
Tabela 12 – Resultados obtidos nos ensaios realizados às bombas.	57
Tabela 13 – Comparação entre os principais parâmetros médios <i>nearshore (plant)</i> e <i>offshore</i> , [15].	60
Tabela 14 – Distribuição anual baseada na frequência de ocorrência para cada classe de H_{m0} , T_{-10} para grupo direcionais de 10° , [15].	60
Tabela 15 – Condições de agitação marítima para os ensaios preliminares.	61
Tabela 16 - Programa de ensaios preliminares, dimensões em protótipo.	61
Tabela 17 – Condições com ondas regulares ensaiadas.	63
Tabela 18 – Programa de ensaios para ondas regulares, dimensões do protótipo.	63
Tabela 19 – Condições de ondas irregulares ensaiadas.	64
Tabela 20 – Programa de ensaios com ondas irregulares, dimensões do protótipo.	65
Tabela 21 – Tabela de índices de comparação entre C2 e C3.	71
Tabela 22 – Largura de captura para as diferentes orientações.	75

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

C_i – Combinação i [-]

d_r – Altura da rampa de aproximação [m]

E – Estimativa da produção energética anual [Wh]

F_r – Número de Froude [-]

F_{rM} – Número de Froude no modelo [-]

F_{rP} – Número de Froude no protótipo [-]

g – Aceleração da gravidade [m/s^2]

h – Profundidade de água [m]

H – Altura de onda [m]

H_s e H_{m0} – Altura de onda significativa [m]

HD_j – Distância horizontal entre reservatórios [m]

L_n – Comprimento dos reservatórios [m]

L_M – Comprimento no modelo [m]

L_P – Comprimento no protótipo [m]

N_g – Fator de escala de aceleração [-]

N_L – Fator de escala geométrico [-]

N_T – Fator de escala de tempos cinemáticos [-]

N_V – Fator de escala de velocidades [-]

P_{wave} – Potência média das ondas por unidade de largura [W/m]

P_{crest} – Potência à entrada dos reservatórios por unidade de largura [W/m]

$P_{R,j}$ – Potência média à entrada do reservatório j [W]

P_T – Somatório das potências médias à entrada dos três reservatórios [W]

P_w – Potência média à entrada do reservatório por metro de frente [W/m]

P_p – Potência média produzida [W]

$q_{0v,j}$ – Caudal médio de galgamento no reservatório j por unidade de largura [$m^3/s/m$]

q_b – Caudal médio de funcionamento da bomba [m^3/s]

$R_{c,n}$ – Nível da entrada do reservatório n [m]

Res_n – Reservatório ou reservatório auxiliar n [-]

T – Período das ondas regulares [s]

T_p – Período de pico da agitação marítima [s]

T_e e $T_{.10}$ – Período energético da agitação marítima [s]

t – Tempo de funcionamento da bomba [t]

t_T – Tempo de duração do ensaio [s]

T_M – Tempo no modelo [s]

T_P – Tempo no protótipo [s]

$V_{R,j}$ – Volume de água recolhido no reservatório j [m^3]

w – Largura de captura do dispositivo [m]

α_R – Ângulo da rampa de aproximação [°]

η_{Hyd} – Eficiência hidráulica [-]

η_{Res} – Eficiência dos reservatórios [-]

η_{Turb} – Eficiência da turbina [-]

η_{Gen} – Eficiência do gerador [-]

$\eta_{overall}$ – Eficiência Global [-]

ρ – Massa volúmica da água [kg/m^3]

θ_j – Ângulo das frentes dos reservatórios [°]

θ_v – Direção vetorial média da agitação [°]

ZEE – Zona económica exclusiva

PTO – *Power take off*

OWC – *Oscillating water column*

U-OWC ou J-OWC – *U-Oscillating water column*

COPPE/UFRJ – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

MSL ou MWL – Nível médio da água do mar

SSG – *Sea-wave Slot-cone Generator*

JONSWAP – *Joint North Sea WAve Project*

1

INTRODUÇÃO

A utilização excessiva dos combustíveis fósseis originou, nos últimos anos, impactos ambientais negativos como a subida da temperatura média da Terra, o aumento do nível das águas do mar, o degelo dos polos e outros glaciares, deterioração da qualidade do ar, etc. Além disso, o facto de as fontes fósseis não se renovarem à mesma velocidade a que são consumidas levanta uma questão económica negativa, que consiste na subida gradual do custo deste tipo de energia à medida que a fonte vai escasseando. Assim, é necessário aumentar a presença de energias renováveis no total de energia elétrica produzida a nível mundial, o mais rápido possível, de maneira a mitigar a tendência negativa que se verifica.

A energia elétrica é uma parte essencial da vida moderna. Está presente em qualquer edifício, sendo utilizada para iluminação, aquecimento ou arrefecimento e alimentação de aparelhos eletrónicos. É das formas energéticas mais utilizadas pela humanidade devido à sua facilidade de transporte e baixo índice de perda de energia durante conversões.

O consumo de eletricidade a nível mundial tem apresentado um aumento gradual ao longo dos anos. No ano de 2012 o consumo mundial foi de 19 500 TWh, sensivelmente o dobro do valor registado no ano de 1990 (10 000TWh) (Figura 1).

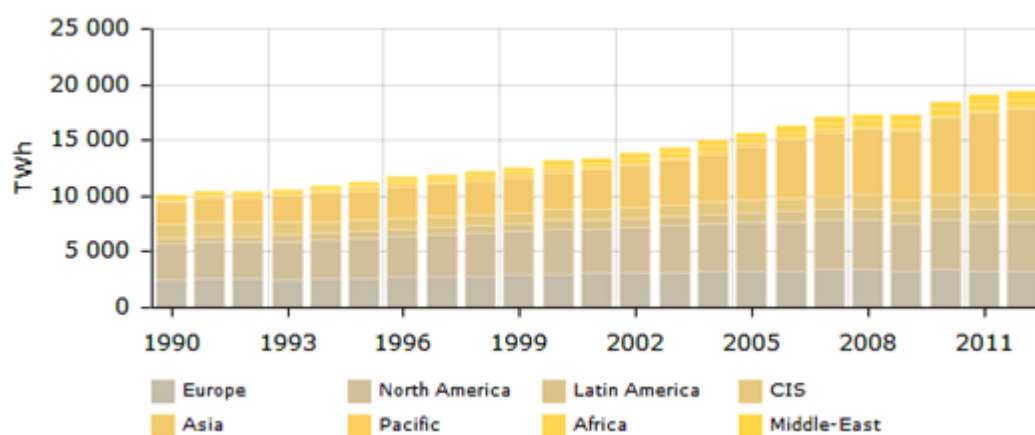


Figura 1 - Consumos mundiais anuais de eletricidade [1].

O consumo dos países desenvolvidos está, em geral, a decrescer de ano para ano, contrariamente ao que acontece nos países em desenvolvimento, nomeadamente os BRICS (Brasil, Rússia, Índia, China e

África do Sul). A título de exemplo, de 2011 para 2012, os BRICS aumentaram o consumo elétrico em 4.6% enquanto os G7 (E.U.A., Reino Unido, Japão, Alemanha, França, Itália e Canadá) reduziram em 1.1% [1].

Em Portugal, o consumo anual de energia elétrica dos últimos anos tem sido relativamente constante. De 2006 até 2011 (Figura 2) não têm ocorrido grandes variações na distribuição de eletricidade tendo-se mantido na ordem dos 46 000 GWh. No ano de 2012, o consumo reduziu para 44 655 GWh, o que pode ser explicado pela atual conjuntura económica portuguesa aliada à crescente sensibilização das populações das necessidades de utilização da eletricidade de uma forma sustentável. Analisando a Figura 3 percebe-se que, nos últimos anos, tem havido um crescimento na implementação de energias renováveis (hídrica, mini-hídrica e eólica), o que provocou uma redução da capacidade instalada da energia térmica.



Figura 2 - Evolução do consumo elétrico em Portugal [2].

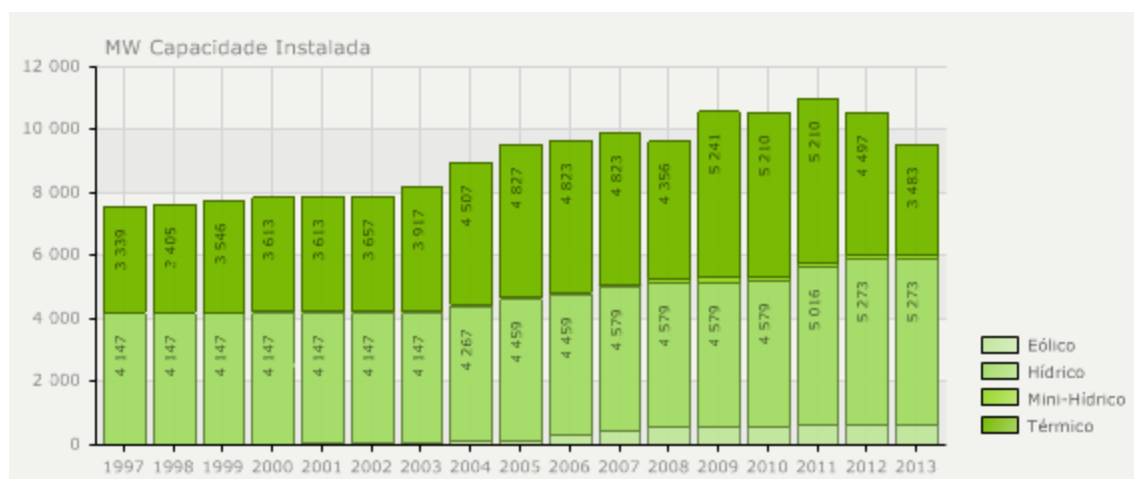


Figura 3 – Capacidade instalada para as diferentes fontes de produção de eletricidade em Portugal [2].

A exploração de energias renováveis para produção de eletricidade é uma preocupação mundial. Apesar de se esperar um aumento deste tipo de produção de energia, é de salientar que nunca é demais esse aumento tendo em conta as vantagens que esta significa quando comparada com as energias fósseis (líderes no mercado da eletricidade). Se forem mantidas as políticas nacionais de incentivo e

sensibilização para a causa em questão é de esperar que no ano de 2030 entre 40 a 50% da eletricidade consumida globalmente seja proveniente de fontes renováveis [3].

Na União Europeia, foi apresentada no ano de 2009, uma diretiva com o intuito de promover o uso de energia oriunda de recursos renováveis. Esta requer que da eletricidade consumida pelos estados membros da União Europeia, no ano de 2020, um mínimo de 34% seja oriunda de fontes renováveis [4]. De uma forma menos oficializada, durante um discurso, o governo dos Estados Unidos da América estabeleceu como meta, para o ano de 2035, que 80% da eletricidade do país fosse de origem renovável [5]. Para além das metas já referidas existem mais alguns países com objetivos estabelecidos para 2020: Egito (20%), Irlanda (40%), Madagáscar (75%), Filipinas (40%) e Tailândia (14%) [3]. Algumas metas estendem-se até 2030: Kuwait (15%), África do Sul (42%) e Tunísia (40%) [3].

No cenário nacional, a meta de fontes de energia renováveis no consumo bruto de energia em 2020 será cumprida através da incorporação na rede de distribuição de 59,6% de eletricidade proveniente de fontes renováveis [6]. Para tal, em 2020, Portugal deverá registar um total de 15 824 MW de potência instalada, que, face ao valor verificado em 2011 (potência renovável instalada de 10.623 MW), corresponde a um aumento de 49% [6]. Em termos de energia elétrica produzida a partir de fontes de energia renovável, o aumento previsto para o horizonte de 2020 será de 29%, correspondendo a 32 300 GWh, face aos 24 983 GWh registados em 2011 (Figura 4).

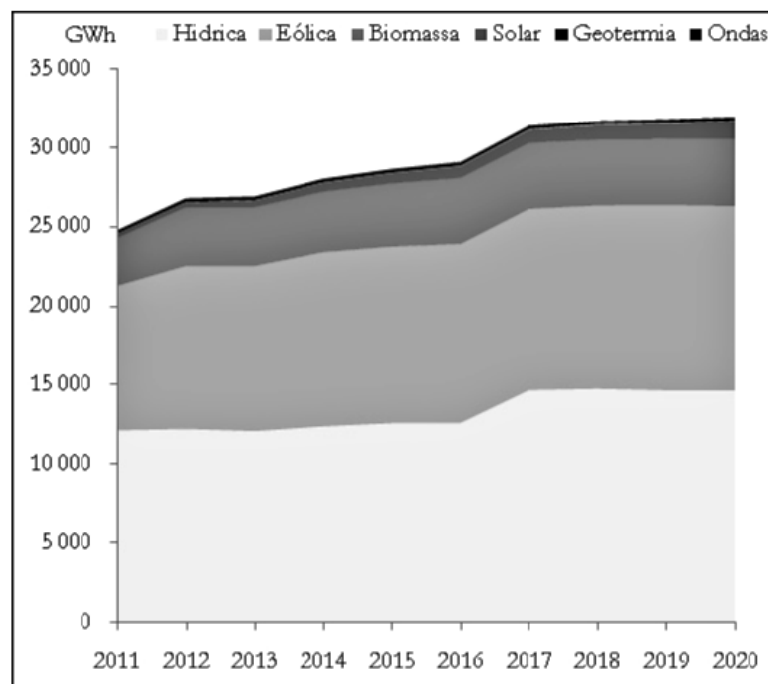


Figura 4 - Evolução estimada da produção de eletricidade a partir de fontes de energia renovável [6].

Portugal possui a terceira maior Zona Económica Exclusiva, ZEE (espaço marítimo que um país detém, no qual tem direitos na utilização dos seus recursos, tanto vivos como não vivos) da União Europeia e a 11ª maior de todo o mundo. Esta representa sensivelmente vinte vezes o território nacional “terrestre” e pode-se revelar determinante na questão das energias renováveis em Portugal.

Tendo em conta o potencial marinho português evidenciado anteriormente e a urgente necessidade de aumentar a produção de eletricidade por meio de energias renováveis, a presente dissertação apresenta

como principal objetivo o desenvolvimento de um dispositivo para a conversão da energia das ondas aplicável em Portugal. Para tal é efetuada uma análise dos métodos existentes para o aproveitamento desta energia marinha para fundamentar a escolha do tipo de aproveitamento ideal a desenvolver. Uma vez definido o dispositivo este foi reproduzido à escala para, depois de definida uma metodologia de análise, proceder ao estudo através da modelação física.

A dissertação está estruturada em quatro capítulos. No presente capítulo é realizado um enquadramento geral do âmbito a que esta dissertação se refere e são apresentados os principais objetivos do trabalho. No capítulo 2 são descritas as distintas formas de aproveitamento da energia marinha e, mais aprofundadamente, as formas de aproveitamento da energia das ondas. No mesmo capítulo são ainda comparadas as formas de aproveitamento da energia das ondas para basear a decisão da tecnologia a estudar, sendo a tecnologia escolhida caracterizada extensivamente de seguida. O capítulo 3 é constituído por uma introdução teórica sobre a modelação física, uma descrição do modelo desenvolvido, da instalação e procedimentos experimentais realizados e os resultados obtidos. Por fim, são apresentadas as considerações finais relacionadas com todo este trabalho assim como possíveis desenvolvimentos futuros a realizar sobre o tema.

2

ESTADO DA ARTE

2.1. INTRODUÇÃO

O presente capítulo é iniciado com uma breve caracterização do estado da arte do aproveitamento da energia do oceano no seu global. De seguida é realizada uma descrição mais aprofundada do estado da arte do aproveitamento de energia das ondas através de dispositivos inseridos em estruturas de defesa costeira ou portuárias, complementada com a apresentação de diversos exemplos de estruturas deste tipo. Com base nesses exemplos é realizada uma análise técnico-económica entre os diferentes tipos de aproveitamento com o objetivo de fazer uma escolha do tipo de sistema a estudar. Escolhido o tipo de aproveitamento, segue-se a caracterização pormenorizada da mesma tecnologia.

2.2. DIFERENTES FORMAS DE ENERGIA MARINHA

O oceano é um recurso inesgotável que apresenta uma grande diversidade de formas de energia renovável como correntes oceânicas, marés, ondas, vento, gradientes de salinidade e energia térmica. Toda esta diversidade de tipos de energia pode e deve ser explorada por forma a produzir eletricidade de maneira renovável, limpa e sustentável, contribuindo assim para o cumprimento das metas referidas na introdução.

As tecnologias de sistemas do aproveitamento de energias marinhas, apesar de serem, em geral, relativamente recentes, estão em constante desenvolvimento, provando que o oceano é fundamental para uma sustentabilidade futura do planeta. Olhando aos dois pontos referidos anteriormente, o facto de os oceanos serem a maior fonte de energia do planeta e a crescente evolução da tecnologia das energias marinhas, pode-se perspetivar o oceano como o principal recurso de energia do Mundo [7], [8]. Os dispositivos de geração de energia desenvolvidos para o efeito em questão encontram-se numa fase inicial de desenvolvimento (à exceção da eólica *offshore*) havendo a necessidade de ultrapassar algumas barreiras quer tecnológicas quer financeiras de maneira a conseguir uma maior competitividade face a outros recursos existentes. Muitas das barreiras tecnológicas a ultrapassar estão relacionadas com a agressividade do meio marítimo para com as estruturas o que levanta problemas como a fiabilidade, a capacidade de subsistência ou mesmo a dificuldade de manutenção. Para além destes, e não menos importantes, existem preocupações com obstáculos não diretamente relacionados com a tecnologia onde se incluem a falta de incentivos financeiros, infraestruturas e logística, os impactos ambientais provocados pela adoção de certas soluções e a perceção pública. É importante que se consiga apoio suficiente de governos e grandes empresas para se passar de um estudo com resultados demonstrados para a comercialização e implementação em grande escala deste tipo de dispositivos.

De forma a compreender cada uma das tecnologias é de todo o interesse apresentar uma breve análise das principais já desenvolvidas.

2.2.1. ENERGIA EÓLICA

Os ventos são originados por gradientes de pressão. Os gradientes de pressão, por sua vez, são resultado da ação da insolação que aquece o planeta de forma não uniforme e, consequentemente, altera a massa específica do ar também de forma não uniforme. Existe, portanto, uma correlação entre a insolação e os ventos, como aliás existe entre a insolação e muitas outras fontes de energia [9].

O aproveitamento deste recurso é semelhante à exploração do mesmo nos parques eólicos terrestres nos quais são utilizadas turbinas de eixo horizontal com três pás. Assim, a exploração do setor eólico *offshore*, estabeleceu-se como uma referência do aproveitamento da energia marinha, baseando-se no desenvolvimento do setor eólico terrestre. No entanto, dada a complexidade de instalação dos sistemas *offshore*, foram-se desenvolvendo diversas soluções para essa mesma instalação, o que provocou o aparecimento de diferentes soluções tecnológicas. A análise das estruturas de suporte é importante, quer estruturalmente, visto que são responsáveis pela fixação e garantia de estabilidade para o correto funcionamento da turbina, quer economicamente porque estas componentes representam cerca de 20% do custo de fabrico e instalação de um parque eólico *offshore* [10]. De uma forma geral, e para assegurar a viabilidade económica, para zonas de baixa profundidade deve recorrer-se a estruturas fixas, caso contrário são aconselhadas as estruturas flutuantes. Na Figura 5 são apresentadas as principais soluções de estruturas de suporte. A análise de soluções para aproveitamento de energia eólica *onshore* não é abordada neste trabalho pelo facto dessa vertente não se inserir diretamente no capítulo das energias marinhas.

Por forma a potencializar o seu desenvolvimento, a eólica *offshore* enfrenta o desafio de aproveitar este tipo de energia em mar aberto e em zonas de elevada profundidade nunca descurando a sua viabilidade económica.

2.2.2. ENERGIA DAS MARÉS E CORRENTES OCEÂNICAS

As marés são oscilações periódicas do nível médio da água do mar devido às ações gravíticas da lua e do sol sobre a Terra. O facto de se tratar de um fenómeno constante e possível de prever, fazem deste um recurso interessante para explorar. As correntes oceânicas são resultado de diferenças de temperatura, densidade ou salinidade, em conjunto com a ação do vento e podem ser classificadas como fluxos contínuos e unidireccionais.

O aproveitamento da energia das marés utiliza o princípio de contenção de marés que é feito com recurso a estruturas tipo barragens ou lagoas. Só no caso das últimas este tipo de aproveitamento pode ser realizado *offshore*, havendo necessidade no caso das barragens de ser construído *onshore*. Em ambos os casos o funcionamento é parecido com o praticado nas barragens de produção de energia hidroelétrica, usando a diferença de nível de água entre os dois “reservatórios”.

Quanto ao aproveitamento da energia das correntes oceânicas, os principais dispositivos baseiam-se ou na rotação de turbinas de eixo horizontal ou vertical ou na rotação de um parafuso de Arquimedes, que através desse movimento geram energia [9], Figura 6.

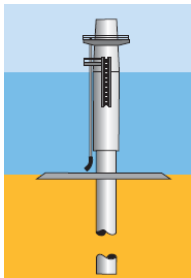

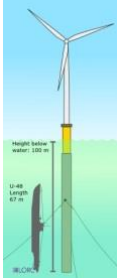

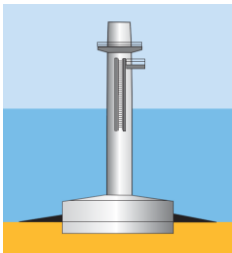



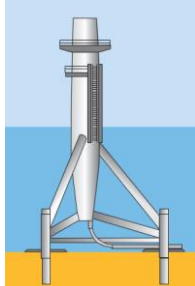
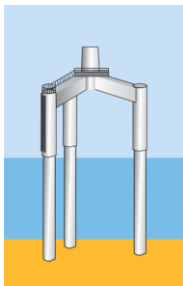
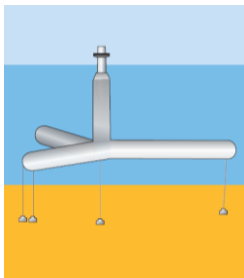

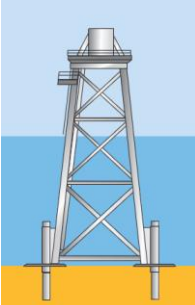



Tipo de solução tecnológica	Estruturas fixas		Estruturas flutuantes	
				 <i>Protótipo Hywind</i>
	<i>Monopile</i>		<i>Spar</i>	
				 <i>Protótipo Windfloat</i>
	<i>GBS (Gravity Based Structures)</i>		<i>Jacket</i>	
				 <i>Protótipo Blue H</i>
	<i>Tripod</i>	<i>Tri-pile</i>	<i>TLP (Tension Leg Platform)</i>	
				 <i>Projeto Sway</i>
	<i>Jacket</i>	<i>Jack-Up</i>	<i>Sway</i>	
	<i>Space Frame Structures</i>			

Figura 5 - Tipos de estrutura de suporte para implementação offshore [11].

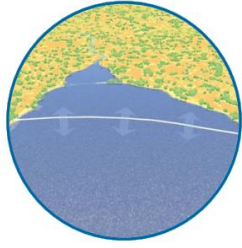

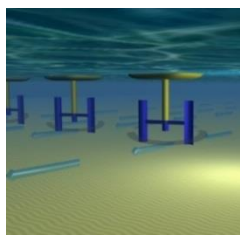
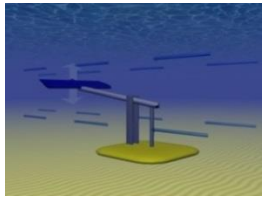

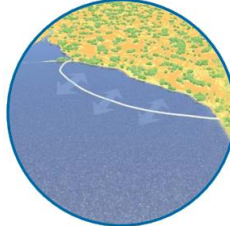
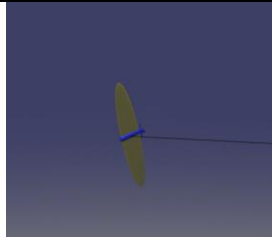
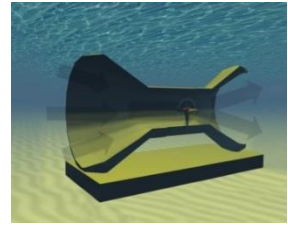
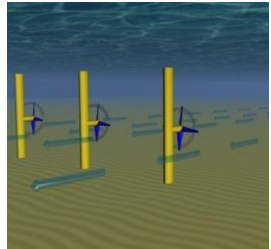

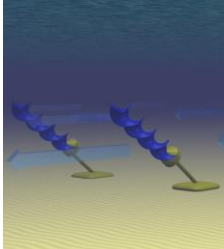

Dispositivos de conversão da energia das marés e correntes oceânicas				
Tipo de solução tecnológica		 <i>Barragem de La Rance</i>		
	<i>Barragem da Maré</i>		<i>Turbina de eixo vertical</i>	<i>Hidrofólio oscilante</i>
				
	<i>Lagoa ao Largo</i>	<i>Lagoa junto à Margem</i>	<i>Papagaio das marés</i>	<i>Efeito de Venturi</i>
		 <i>Protótipo Seagen</i>		 <i>Protótipo Dispositivo Flumill AS</i>
	<i>Turbina eixo horizontal</i>		<i>Parafuso de Arquimedes</i>	

Figura 6 - Tipo de tecnologias de conversão da energia das correntes das marés oceânicas [11].

2.2.3. ENERGIA DO GRADIENTE DE SALINIDADE

A energia do gradiente de salinidade (ou energia osmótica) baseia-se na diferença de energia interna que existe entre a água doce e a água salgada. A tecnologia usada neste tipo de explorações baseia-se na circulação de água através de uma membrana (devido ao diferencial de energias) que pode ser utilizada para colocar turbinas em funcionamento. Para além desta existe também uma tecnologia conhecida por eletrodialise invertida em que a diferença de potencial químico entre a água doce e a água salgada é a própria força motriz do processo [9].

2.2.4. ENERGIA DE GRADIENTE TÉRMICO

A exploração da energia térmica do oceano, consiste no aproveitamento da diferença de temperatura (no mínimo 20°C) entre a água quente superficial e a água mais fria das profundezas que é aproximadamente constante (cerca de 4°C). Quanto maior for a diferença de temperatura mencionada, maior será o potencial de energia produzida o que leva à conclusão de que as latitudes tropicais são as que apresentam um maior potencial teórico de conversão de energia térmica oceânica. Existem dois tipos principais de tecnologias - o sistema de ciclo aberto e o sistema de ciclo fechado (Rankine). Ambos os sistemas consistem na evaporação e posterior condensação de um fluido só que no sistema fechado é usado um fluido de baixo ponto de ebulição e no ciclo aberto o fluido utilizado é a água e é

evaporada numa câmara de vácuo devido à alteração. Neste último método é ainda possível obter água dessalinizada [9].

2.2.5. ENERGIA SOLAR

A energia solar é a principal responsável por todo o dinamismo terrestre, sendo assim o sustento do planeta. O aproveitamento deste tipo de energia é realizado *onshore* já há algum tempo e está de alguma forma implementado. Mais recentemente, devido à ocupação terrestre e ao facto de as zonas com maior potencial solar não se localizarem na costa, houve a necessidade de investigar a possibilidade de desenvolver sistemas para produção de energia eléctrica *offshore* a partir da energia solar. Este é uma investigação que está muito no início, não havendo ainda registo de instalações de estruturas no mar [9].



Figura 7 - Imagem ilustrativa de uma ilha solar [9].

Apesar de se encontrar na fase inicial, existem já patentes, como a ilha solar (Figura 7), que consiste numa membrana circular (diâmetro de 5 km) no cimo da qual estão concentradores solares. No centro da ilha existe uma torre onde se armazena o vapor a alta pressão, produzido ao longo de tubos que recebem a radiação vinda dos concentradores [11], sendo este mesmo vapor usado para gerar energia eléctrica.

2.2.6. MICROALGAS / MACROALGAS PARA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEL

A produção de microalgas ou macroalgas para a produção de biocombustível é uma forma indireta de aproveitar a energia do oceano e apresenta uma grande vantagem em relação às outras energias já mencionadas, que é a possibilidade de armazenamento de uma forma simples. A produção deste tipo de combustíveis pode acabar com uma problemática que surgiu com o aparecimento dos primeiros biocombustíveis – a competição por espaço terrestre entre a produção destes combustíveis e a produção alimentar. Como alternativa ao espaço terrestre, o desenvolvimento desta tecnologia *offshore*, com abundância de espaço disponível para exploração, poderia ser uma solução.

A transformação de microalgas/macroalgas em biocombustível passa por um conjunto de processos, iniciando-se pela seleção do tipo de alga a cultivar (decisão baseada nas condições locais). Segue-se a produção, colheita e processamento da matéria para obtenção dos biocombustíveis [9].

2.2.7. ENERGIA DAS ONDAS

A geração de ondas resulta da ação dos ventos sobre a superfície dos oceanos, existindo portanto uma relação entre o recurso das ondas e a intensidade dos ventos, que por sua vez está diretamente relacionada com o recurso solar. Sendo assim, regiões com maior intensidade de ventos apresentam uma maior densidade do recurso energético das ondas [11]. A avaliação deste recurso é essencial para o planeamento da sua utilização e para o projeto de dispositivos de energia das ondas. A energia das ondas é expressa como uma unidade de potência por metro de crista da onda ou por metro de costa (kW/m) e considera-se um recurso energético ideal para os dispositivos de aproveitamento, aquele que se situe entre os 20 e os 70 kW/m [12]. Valores desta ordem de grandeza podem ser encontrados em latitudes entre os 40 e os 60 graus para ambos os hemisférios (Figura 8), apesar de o recurso ser mais constante no sul do planeta, isto é, enquanto no norte durante o mês de menor intensidade se registam valores de 30% da intensidade média anual, no sul, esses valores são de aproximadamente 60% da média anual [9].

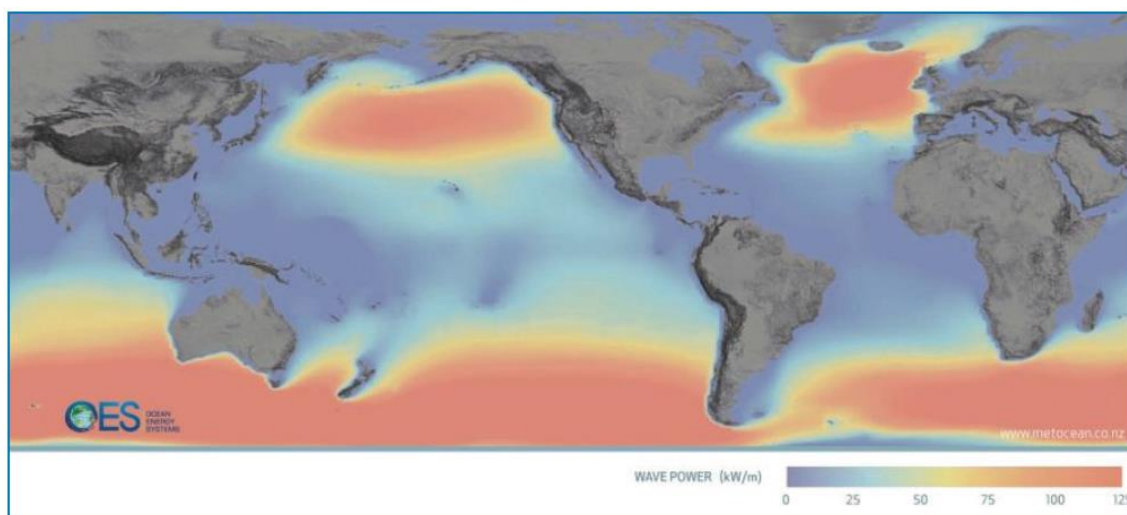


Figura 8 – Fluxo de energia médio anual global [9].

O estudo da agitação marítima num determinado local *nearshore* começa pela recolha e tratamento de dados recolhidos por uma bóia geralmente situada *offshore*. De seguida deve ser realizada uma quantificação das transformações sofridas pelas ondas à medida que se aproximam da costa e aplicar essas mesmas transformações aos dados recolhidos e tratados anteriormente. À medida que as ondas se aproximam da costa vão sofrendo variadas modificações devido a fenómenos que ocorrem em águas de baixa profundidade, como o empolamento, a refração, a difração, a rebentação, interação entre ondas, interação entre ondas e marés e o atrito dos fundos. Para além destes fenómenos deve ter-se em consideração a costa envolvente porque a existência de qualquer zona costeira saliente ou ilha podem providenciar abrigo em relação à localização em estudo e alterar a agitação local [12].

A avaliação dos fenómenos descritos anteriormente é, de uma maneira geral, realizado através de modelos numéricos computacionais que simulam a alteração sofrida pelas ondas ao longo da aproximação da costa. Alguns exemplos de programas informáticos que realizam este tipo de simulação são o MildSim [13], o MIKE 21 SW [14], “inverse-ray refraction model” ou o SWAN que se trata de um programa mais sofisticado que necessita de dados mais concretos de *input* [15].

No que se refere à extração de energia das ondas propriamente dita, existe uma grande variedade de conceitos tecnológicos, assim como uma grande diversidade de sistemas eletromecânicos de produção de energia elétrica (PTO – *power take off*). Do ponto de vista de funcionamento, os dispositivos de aproveitamento de energia das ondas podem aproveitar as diferenças de pressão, o facto de serem flutuantes, os galgamentos ou os movimentos oscilatórios:

- Diferenças de pressão: operam segundo o princípio de Arquimedes ou com base na coluna de água oscilante. No primeiro caso, tratam-se de absorvedores pontuais submersos que quando a crista da onda está sobre o dispositivo, um volume de ar no interior do mesmo é comprimido pelo aumento da pressão hidrostática gerando um movimento descendente. Quando a cava da onda está sobre o dispositivo ocorre o fenómeno inverso, provocando assim um movimento linear repetitivo, contínuo a partir do qual se produz energia. Os sistemas de coluna de água oscilante extraem energia através de uma câmara semi-submersa com uma abertura na parte inferior, que permite que as ondas provoquem oscilações no nível de água, que por sua vez descomprime o volume de ar no interior da câmara. O fluxo gerado por este movimento, aciona uma turbina por forma a produzir energia.
- Flutuantes: têm por base o movimento de corpos flutuantes causado pela ação das ondas. O movimento pode ser vertical, horizontal, por rotação ou por combinação destes, e pode ser feito entre o corpo flutuante e uma estrutura fixa, ou entre dois ou mais corpos.
- Sistemas oscilatórios: estruturas articuladas ou flexíveis posicionadas perpendicularmente à direção de propagação das ondas, o que provoca um movimento relativo de um elemento do dispositivo.
- Sistemas de galgamento: estruturas que permitem o aumento da energia potencial das ondas que nelas embatem, sendo essa água posteriormente conduzida a um reservatório situado num nível superior ao nível da água do mar. Ao ser devolvida ao mar a mesma água faz girar uma turbina de baixa queda [11].

Na Figura 9 apresentam-se alguns protótipos existentes destes tipos de tecnologia onde é possível fazer uma classificação dos dispositivos relativamente à sua localização (*offshore, nearshore e onshore*).

2.3. INTEGRAÇÃO DE SOLUÇÕES DE APROVEITAMENTO DA ENERGIA DAS ONDAS EM INFRAESTRUTURAS COSTEIRAS OU PORTUÁRIAS

Após uma apresentação breve de todas as tecnologias de aproveitamento da energia marinha, segue-se, de forma a ir de encontro aos objetivos da presente dissertação, uma análise detalhada do aproveitamento da energia das ondas *onshore*.

A incorporação de dispositivos de aproveitamento da energia das ondas em infraestruturas costeiras ou portuárias pode, num futuro próximo, revelar-se uma excelente oportunidade de aumento da energia renovável produzida a nível mundial. O previsível crescimento de alguns portos a nível mundial ou até construção de novos aumentará a possibilidade de incorporação deste tipo de dispositivos quer nas estruturas de defesa costeira quer nos quebra-mares portuários. A eventual incorporação da exploração de energia renovável nestas estruturas, para além de uma geração de valor acrescida, permite a distribuição de custos por dois propósitos (geração de energia elétrica e extensão/construção de um porto) minimizando assim uma das problemáticas deste tipo de estruturas, o investimento inicial.

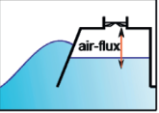
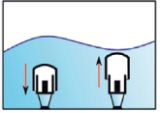
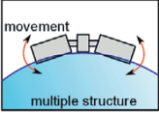
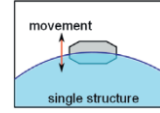
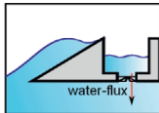
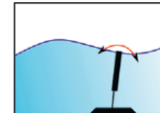

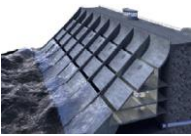










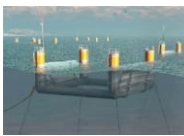
Princípio de funcionamento						
Diferencial de pressão		Estrutura flutuante		Galgamento	Oscilatórios	
Coluna de água oscilante 	Princípio de Arquimedes 	Estrutura múltipla 	Estrutura simples 			
Localização	Onshore					
		Limpet WaveGen (UK) Pico OWC			SSG WaveEnergy (NO)	
	Nearshore					
		Oceanlix Energetech (AU)	CETO III REH (UK)	WaveStar Wave Star (DK)	Seareaser Ecotricity (UK)	Waveplane Waveplane (DK)
	Offshore					
		OE Buoy Ocean Energy (IRL)	AWS AWS Ocean (UK)	Pelamis PWP (UK)	PowerBuoy OPT (USA)	Wave Dragon Wave Dragon (DK)
						
						Langlee LWP (NO)

Figura 9 - Caracterização de alguns sistemas para aproveitamento de energia das ondas [11].

2.3.1. FORMAS DE APROVEITAMENTO DA ENERGIA DAS ONDAS EM INFRAESTRUTURAS COSTEIRAS

O aproveitamento de energia incorporado em estruturas costeiras portuárias pode ser feito através de três tecnologias distintas. A primeira consiste na inserção de uma “coluna de água oscilante” no corpo da estrutura e a outra é conhecida como “overtopping” e consiste no aproveitamento da energia potencial ganha pela água no fenómeno de galgamento. Recentemente foi avaliada a possibilidade de incluir em estruturas portuárias dispositivos que aproveitam a energia das ondas através do movimento de vários corpos flutuantes.

O método da coluna de água oscilante (OWC – oscillating water column) consiste numa estrutura de aço ou betão parcialmente submersa, aberta abaixo da superfície livre da água criando uma espécie de

câmara. Esta contém ar aprisionado no interior, que é forçado a fluir por uma turbina que movimenta um gerador elétrico, quando a superfície livre de água oscila devido à ação das ondas incidentes (Figura 10). A turbina Wells é aconselhada para este tipo de dispositivos porque gira sempre no mesmo sentido, independentemente do sentido do fluxo de ar (a ser expelido ou admitido na câmara), evitando assim o dispendioso uso de sistemas de válvulas de retenção.

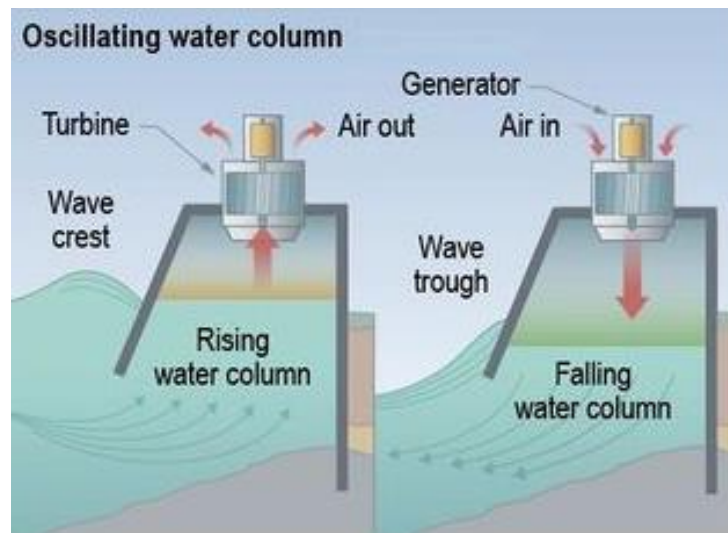


Figura 10 – Esquema representativo do funcionamento da coluna de água oscilante (OWC) [16].

O segundo método é baseado na captura da água que se espraia na estrutura em reservatórios, onde é armazenada a uma cota superior à do nível médio da superfície da água envolvente. O acréscimo de energia potencial obtido através do espraio/galgamento (*overtopping*) é transformado em energia elétrica através de turbinas hidráulicas de baixa queda [12]. A produtividade deste tipo de dispositivo é altamente dependente da agitação marítima presente no local, da batimetria dos fundos na envolvente do dispositivo, do desenho das componentes das estruturas onde ocorre o espraio e do desempenho da(s) turbina(s) [13], Figura 11.

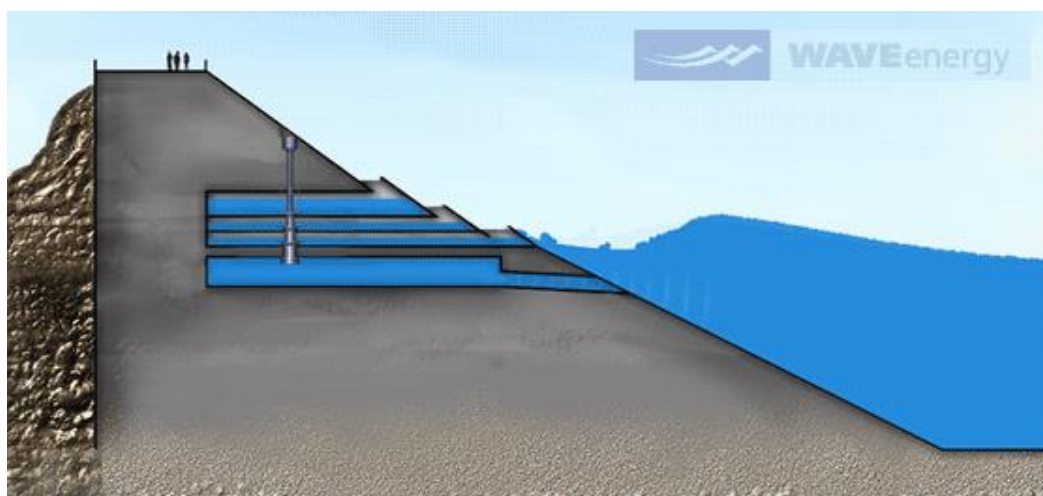


Figura 11 – Esquema representativo do funcionamento dos dispositivos de *overtopping* [17].

Recentemente foi avaliada, no Brasil (um projeto da COPPE/UFRJ), a possibilidade de incluir em estruturas portuárias dispositivos que aproveitam a energia das ondas através do movimento de vários corpos flutuantes (*multibody*). O corpo flutuante encontra-se ligado a um braço que transmite o movimento provocado pelas ondas a uma bomba hidráulica que, por sua vez, força a entrada de água numa câmara sob pressão. Quando a água se encontra a uma dada pressão, é libertada formando um jato de água que faz girar uma turbina aliada a um gerador elétrico produzindo assim eletricidade [18], Figura 12.

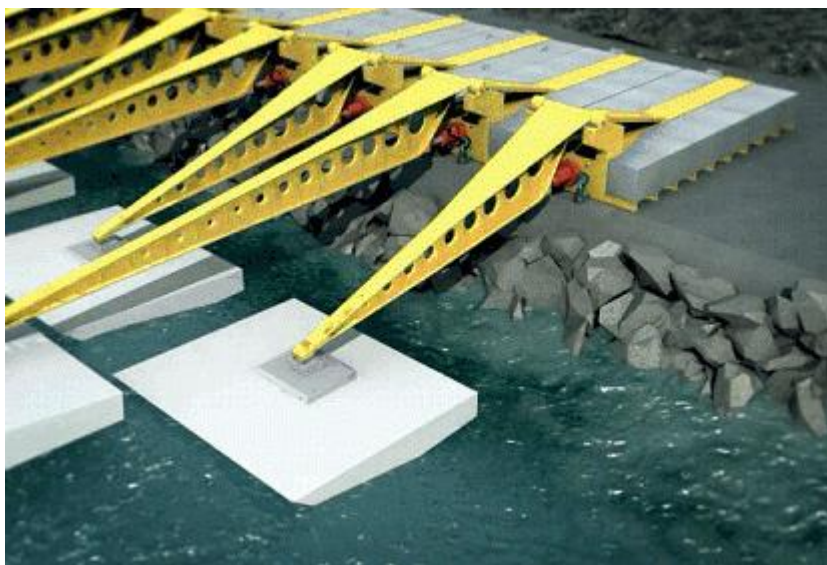


Figura 12 – Esquema representativo da tecnologia *multibody* [19].

2.3.2. SOLUÇÕES DE APROVEITAMENTO DE ENERGIA DAS ONDAS *ONSHORE* EXISTENTES OU EM FASE DE DESENVOLVIMENTO

2.3.2.1. Mutriku OWC Plant

A estrutura de aproveitamento da energia das ondas de Mutriku, no norte de Espanha, foi a primeira deste tipo a ser inserida num quebramar e iniciou a seu o funcionamento em Julho de 2011 [20].

No ano de 2002, as autoridades locais, com o objetivo de resolver os problemas de acesso ao porto de Mutriku devido à agitação marítima e ao facto da entrada do porto ser muito estreita, decidiram apresentar o projeto de um novo quebramar. O projeto escolhido consiste num quebramar de taludes destacado, com aproximadamente 440 m de comprimento e com profundidades variáveis entre os -2.00 m e os -17.00 m. Com o projeto inicial da estrutura portuária definido surgiu a possibilidade de tomar partido desta construção para instalar um dispositivo para o aproveitamento da energia das ondas. Essa possibilidade foi acordada e passou-se ao processo de seleção da tecnologia a utilizar, que após uma análise do estado da arte se concluiu que a OWC (coluna de água oscilante) seria a tecnologia mais vantajosa.

O estudo do recurso marinho para aproveitamento energético revelou-se indispensável para saber quais as potencialidades de produção de energia no local em causa. Tendo por base dados recolhidos *offshore*, obteve-se, para a costa de Mutriku, a uma profundidade de 30 m os seguintes valores de fluxos de energia:

- Fluxo de energia médio no Inverno: 18kW/m
- Fluxo de energia médio no Verão: 4.8kW/m
- Fluxo de energia médio em períodos de transição: 8.8kW/m [20].

Conhecido o fluxo de energia foi possível testar várias opções num modelo físico 3D para determinar a melhor posição para o dispositivo de aproveitamento da energia das ondas (Figura 13). Este dispositivo consiste em 16 câmaras, estando o topo de cada uma ligado a um gerador elétrico com uma potência instalada de 18.5kW, o que perfaz uma potência total instalada de 296kW.



Figura 13 - Fotografia do quebramar de Mutriku com incorporação do grupo gerador de energia elétrica [21].

Para proceder à inclusão do grupo OWC, foi necessário substituir o manto resistente ao longo de 100 m (blocos calcários de 25 toneladas) do quebramar de taludes, por uma secção vertical formada por componentes pré-fabricadas para facilitar o processo construtivo. Estes elementos são de forma trapezoidal com 12.25 m de comprimento, largura mínima de 5.80 m (no interior da curvatura do quebramar – X1 (Figura 14) e máxima de 6.10 m – X2 (Figura 14)). Este tipo de geometria gera um raio de curvatura na estrutura que faz com que esta coincida com a curvatura do quebramar. Estes elementos foram construídos com betão armado e as paredes têm 0.40 m ou 0.50 m de espessura dependendo da zona da estrutura.

A abertura que transmite as oscilações das ondas para a coluna de ar tem 3.20 m de altura, 4.00 m de largura e o seu ponto mais baixo encontra-se à cota -3.40 m, para que a abertura se encontre sempre abaixo do nível médio da água do mar.

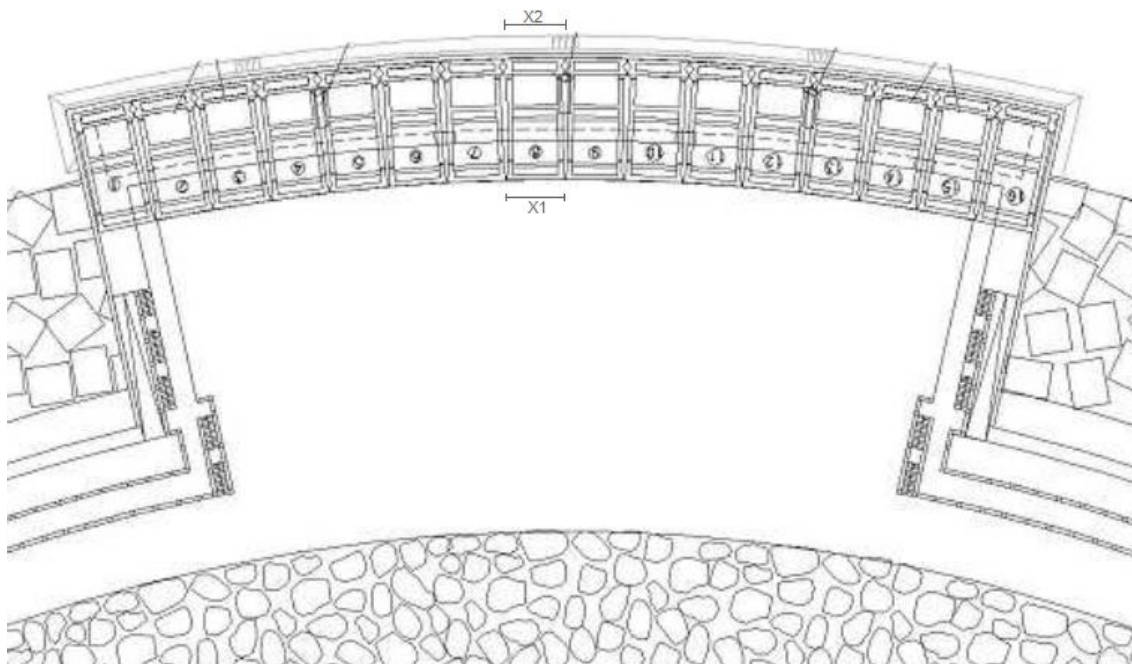


Figura 14 - Zona de localização dos grupos de extração de energia das ondas (pré-fabricada) [20].

Com exceção das 16 células que contêm as colunas de ar, as células dos pré-fabricados foram cheias com betão ou com agregado rochoso para assegurar o devido desempenho estrutural.

Acima dos componentes pré-fabricados é construída uma superestrutura em betão armado *in-situ* com 0.80 m de espessura, sobre a qual é instalada a galeria da turbina.

Por fim, a plataforma originada entre o quebramar de taludes e a estrutura de aproveitamento de energia das ondas é preenchida com blocos paralelepípedicos de betão pré-fabricado (3.00 m de largura, 6.00 m de comprimento e 1.60 m de altura) [20].



Figura 15 – Colocação de uma dos elementos pré-fabricados [20].

Concluída a empreitada, o investimento relacionado com os trabalhos de engenharia civil ascenderam a 24.5 M €, dos quais 4.4 M € foram atribuídos à estrutura de aproveitamento da energia das ondas e o restante ao quebramar de taludes. Com o objetivo de orçamentar a estrutura de exploração, deve-se somar aos 4.4M€ o valor de 2M€ correspondente ao custo de todo o sistema de geração de energia (16 turbinas, elementos de condicionamento de controlo e potência, centro transformador, estudos e testes para projetar a estrutura e alterações feitas ao quebramar inicial e consequentes testes) [20]. Analisando os valores dos custos de cada componente pode-se concluir que aproximadamente 25% do investimento total é referente à estrutura de aproveitamento de energia.

No decorrer do Inverno de 2009, durante uma grande tempestade, a estrutura de exploração de energia sofreu graves estragos nas câmaras de coluna de ar. Este acontecimento levou a trabalhos de reforço da estrutura através da construção de uma espécie de parede de proteção para as zona danificadas.

Os dispositivos começaram a funcionar em Julho de 2011 e durante o primeiro ano de funcionamento foram produzidos cerca de 200 000 kWh um pouco abaixo dos esperados 600 000 kWh. A discrepância entre o valor previsto e o valor registado pode ser explicada pela ocorrência de testes operacionais durante o período em causa e pela inundação da galeria da turbina ocorrida durante uma tempestade em Dezembro de 2011 que causou danos menores mas obrigou à paragem da central para reparações [20].

2.3.2.2. LIMPET

O LIMPET (*Land Installed Marine Power Energy Transmitter*) 500, Figura 16 e Figura 17, é um dispositivo de aproveitamento da energia marinha instalado *onshore* que utiliza a tecnologia de coluna de água oscilante (OWC). Localiza-se perto de Pornahaven na ilha de Islay na Noruega e a sua construção foi concluída no ano de 2000 em que se iniciou também a exploração.

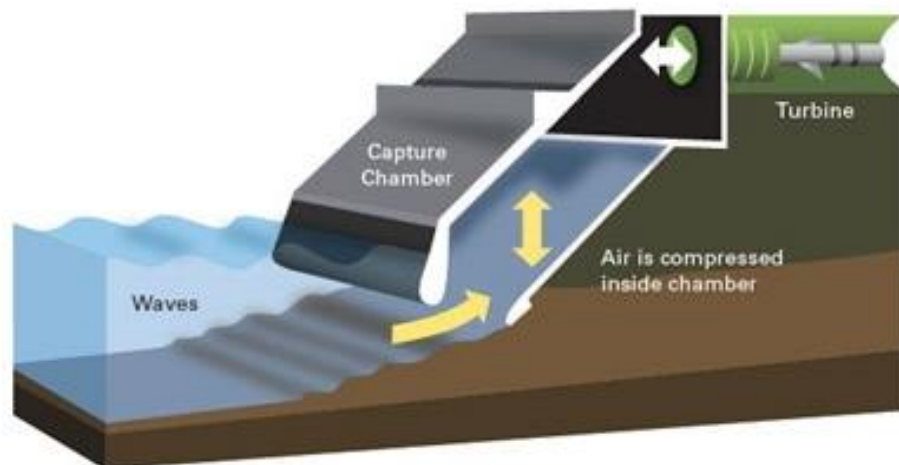


Figura 16 – Funcionamento da central LIMPET 500 [22].

A central consiste numa estrutura de betão *in-situ* e uma unidade de geração de energia, instalada atrás da estrutura de betão (que proporciona alguma proteção em relação à ação do mar), constituída por turbinas *Wells* montadas diretamente no eixo do gerador.

A estrutura de engenharia civil foi construída numa encosta rochosa, que teve de ser escavada de topo para o nível do mar, deixando um dique rochoso para proteger das ações marítimas e facilitar a

construção. O método construtivo adotado provocou um posicionamento ligeiramente recuado, por parte da estrutura, em relação à linha de costa envolvente.



Figura 17 – Fotografia da parte de trás da estrutura [23].

A central foi dividida em três câmaras de 6.00 m de altura por 6.00 m de largura com um ângulo de 40° com a horizontal. A inclinação permite uma mais fácil entrada e saída da água na câmara resultando em menos turbulência e menos energia desperdiçada (comprovado por ensaios realizados em tanque de ondas). A divisão da largura total do dispositivo em três serviu para reduzir a probabilidade de ocorrência de agitação transversal das ondas o que originaria uma redução do desempenho da central. As características da instalação são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características de projeto do LIMPET 500, adaptado de [24].

Geometria		Características das ondas/mar	
Largura total	21.0m	Prof. na extremidade	6.0m
N.º de câmaras, largura	3 x 6.0m	Altura de onda de projeto	4.4m
Ângulo das câmaras	40° à horiz.	Período de projeto	13.4s
Prof. (MWL) da extremidade	2.3m	Período de retorno	N/A
Altura total acima MWL	12.8m	Máx. tensão proj. das ondas	600kN/m ²
Turbina		Gerador	
Diâmetro	2.6m	Tipo	F3GTS 400 G8G
Vel. De operação	1050rpm	Potência nos terminais	2 x 250kW
N.º de Turbinas	2	Tipo de rotor	Rotor bobinado
Disposição	em linha	Voltagem	400V
Forma das pás	NACA 12	Velocidade	1016rpm

O fluxo de energia da agitação marítima, durante a fase conceptual, foi estimado em 20kW/m na frente da estrutura. No decorrer da fase de projeto, testes de modelo conduziram a valores de 17.9kW/m na frente de estrutura. Finalmente, durante a exploração, os valores medidos desceram ainda mais para a ordem dos 12kW/m no mesmo local. A eficiência do dispositivo é apresentada na Tabela 2.

Tendo em consideração os dados recolhidos entre Setembro de 2000 e Março de 2002, foi possível calcular uma produção anual de aproximadamente 35 000kWh. Do valor referido de produção é de salientar que cerca 7 500kWh são gastos pela própria central durante o processo de geração de energia o que resulta em sensivelmente 28 000kWh distribuídos para a rede de energia elétrica.

Tabela 2 - Eficiências estimadas e medidas para as diferentes fases do processo de extração, adaptada de [24].

Fases de conversão de energia	Estrutura/Dispositivo	Eficiência estimada (%)	Eficiência medida (%)
Ondas para câmara pneumática	Coluna de água oscilante	80	64
Câmara pneumática para turbina <i>Wells</i>	Turbina <i>Wells</i>	60 (média)	40 (média)
Turbina <i>Wells</i> para gerador elétrico	Gerador	100	32
Eficiência Total		48	8

De seguida apresentam-se alguns problemas que foram determinantes no projeto, custo e desempenho da central. Os estudos realizados sobre a localização final da estrutura não foram suficientemente aprofundados e apresentavam alguns erros, como o subestimado atrito provocado pelos fundos em frente à central. O método de construção civil adotado resultou numa proteção insuficiente da área de trabalhos e a remoção do dique temporário provocou uma acumulação de fragmentos de rocha em frente à estrutura que acabaram por obstruir a entrada das câmaras. A inundação da galeria devido ao galgamento da estrutura causou paragens na exploração, o que foi posteriormente resolvido com a instalação de uma porta apropriada para este tipo de ambientes. A adaptação da turbina para atenuar problemas acústicos acabou por reduzir a eficiência da turbina para cerca de 75% da eficiência original [24].

Os participantes no projeto reportaram certos aspetos que poderiam ter impacto em qualquer futuro projeto de uma estrutura de coluna de água oscilante. Um deles é a otimização do *design* do dispositivo para a profundidade existente na frente de uma estrutura em particular [24]. Através da medição das ações efetivamente atuantes na estrutura foi possível concluir que as forças de dimensionamento adotadas eram superiores em cerca de três vezes assim como foi possível também concluir que o fenómeno de “wave slam” no interior das câmaras é menor que o previsto.

2.3.2.3. OWC da ilha Pico

O projeto do Pico é uma coluna de água oscilante de 400kW construída num pequeno desfiladeiro natural perto de Porto Cachorro na ilha do Pico nos Açores. Começou a ser construído em 1996 e foi acabado dois anos depois, mas devido a danos provocados por uma inundação aliados à falta de fundos para reparação da estrutura, o projeto foi abandonado durante alguns anos.

A estrutura, muito semelhante à já apresentada LIMPET 500, consiste numa componente de betão *in-situ* com o dispositivo de geração de energia localizado imediatamente atrás da parede superior. Está equipada com uma turbina-gerador *Wells* de eixo horizontal inserida numa pequena câmara que assegura o isolamento dos equipamentos. As principais características da central do Pico são apresentadas na Tabela 3.



Figura 18 – Parte posterior da central do Pico [25].

Tabela 3 - Características de projeto da central do Pico, adaptada de [24].

Geometria		Características das ondas/mar	
Largura total	12.0m	Prof. na extremidade	8.0m
N.º de câmaras, largura	1 x 12.0m	Altura de onda de projeto	7.5m
Ângulo das câmaras	60º à horiz.	Período de projeto	12.0s
Prof. (MWL) da extremidade	2.5m	Período de retorno	N/A
Altura total acima MWL	15.0m	Máx. tensão proj. das ondas	700kN/m ²
Turbina		Gerador	
Diâmetro	2.6m	Tipo	Indução, bobinado, Kramer
Vel. De operação	750-1500rpm	Potência nos terminais	400kW
N.º de Turbinas	1	Tipo de rotor	Bobinado, anel deslizante
Disposição	eixo horizontal	Voltagem	400V
Forma das pás	NACA 15 na raiz e NACA 12 na ponta	Velocidade	1400rpm

Através da medição do fluxo de energia das ondas no local da central do Pico, determinou-se um valor de 13.4kW/m na extremidade da câmara coletora.

O *Wavec Offshore Renewables* assumiu, no ano de 2003, a responsabilidade pela central e com algum financiamento próprio e nacional conseguiu reparar a estrutura e em 2005 realizar os primeiros testes. Os testes revelaram limitações técnicas persistentes no grupo de geração que requeriam fundos que a empresa não possuía. Contudo, a equipa encarregue de projeto insistiu na manutenção e melhoramento contínuo da central, permitindo um aumento nas horas de operação e energia produzida entre 2006 e 2008. Em 2009 e 2010 foram conseguidas melhorias como a redução das vibrações entre a turbina e o gerador e a adição de um circuito de segurança que permite à central operar autonomamente (sem a presença de um operador). Após as melhorias conseguidas, os resultados revelaram um grande aumento nas horas de funcionamento da central e também na quantidade de energia produzida. No período de Setembro de 2010 até Dezembro de 2010, a central produziu 45.193kWh em 1450 horas de funcionamento (Figura 19) [26].

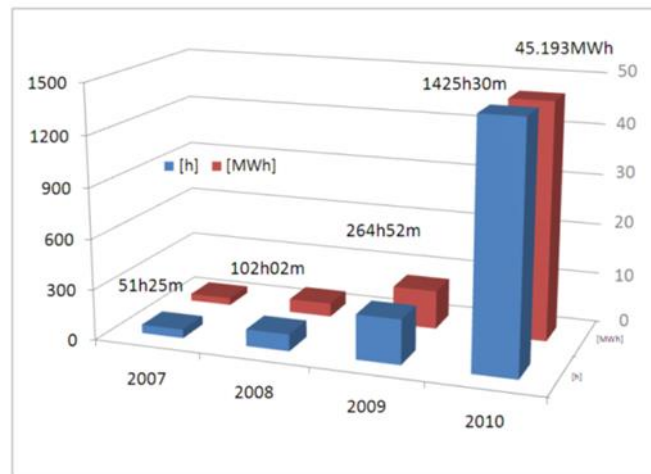


Figura 19 - Evolução das horas de produção e da energia produzida [26].

A central foi recentemente classificada, no âmbito do projeto Europeu MaRINET, como uma das infraestruturas mais relevantes no âmbito da investigação da energia das ondas [26], contudo para que seja possível realizar atividades de pesquisa, e devido ao elevado grau de degradação da estrutura de betão, a central deve ser submetida a um investimento entre 1.5M € e 2M € para reparações. Segundo o *Waveplam*, o investimento feito no Pico desde o início do projeto até à data ronda os 5M € [27]. De acordo com o responsável pela central, mais de metade dos custos são relativos aos trabalhos de engenharia civil. Estudos levados a cabo em Portugal após a implementação desta solução revelaram que o custo da estrutura de betão, para um projeto similar ao do Pico, poderia ser reduzido para cerca de um terço do valor gasto no Pico [24].

O projeto em causa, sendo pioneiro, serviu para ter os primeiros contactos com este tipo de aproveitamento de energia das ondas e permitiu obter informações para futuros investimentos, quer de erros cometidos no mesmo, quer de inovações tecnológicas realizadas no decorrer da sua exploração. A atribuição da empreitada a uma empresa especializada em trabalhos marítimos é essencial para o bom funcionamento da estrutura de engenharia civil. A construção debaixo de água deve ser minimizada. A instalação de uma válvula *bypass* de controlo é uma medida relativamente económica de aumentar a eficiência de uma turbina *Wells* convencional. Esta medida é principalmente eficiente na presença de condições marítimas agrestes porque controla a velocidade do ar que faz operar a turbina. Se a velocidade do ar a passar na turbina for muito elevada pode mesmo forçar a paragem do mecanismo. Para além do dispositivo anterior, pode ainda ser instalado um gerador de velocidade variável que permite que a turbina funcione corretamente para uma vasta gama de estados de agitação marítima [24].

2.3.2.4. REWEC3 (Resonante Wave Energy Converter 3)

O REWEC3 é um dispositivo patenteado semelhante à coluna de água oscilante (OWC), composto por uma câmara interior com ar que é alternadamente comprimida ou expandida através do movimento da superfície da água. Porém, a ligação entre a câmara mencionada e a agitação marítima, é feita através de um pequeno canal de água vertical (por este motivo também chamado de U-OWC ou J-OWC) (Figura 20). Esta solução altera o modo de funcionamento do dispositivo, em relação ao OWC, visto que as ondas não se propagam para o interior da câmara interior, sendo a oscilação da superfície interior provocada pela variação da pressão da agitação atuante na abertura do canal vertical.

De acordo com estudos levados a cabo por Boccotti [28], nos quais se comparou o comportamento de um OWC e um U-OWC, ambos incluídos num quebramar, foi possível concluir que a nova tecnologia é mais eficiente no caso de ocorrência de grandes ondas e também de pequenas ondas. Para além da melhor performance, constatou-se que o fator de segurança, considerando estruturas com o mesmo peso, é maior no caso do U-OWC, por isso mais seguro [29].

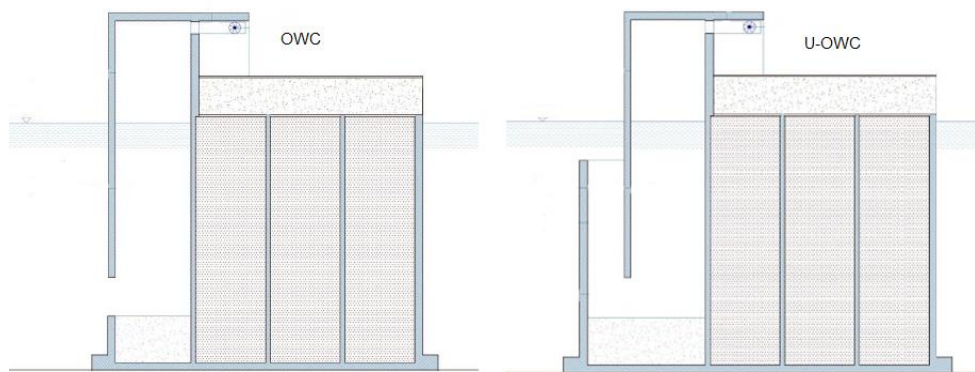


Figura 20 – Desenho esquemático do tradicional OWC e do U-OWC [14].

No ano de 2012, foi projetada a extensão do quebramar “C. Colombo” com incorporação de um dispositivo REWEC3 no Porto de Civitavecchia, Itália (Figura 21). A obra foi adjudicada em 2012, começada em Julho do mesmo ano e está previsto que seja concluída no início de 2015.

O principal quebramar do porto (C. Colombo) vai ser prolongado em 510 m através da utilização de caixões REWEC3 e vai atingir profundidades de 15 m. Cada caixão referido tem 33.94 m de comprimento e está dividido em 8 células independentes para aproveitamento de energia com 3.87 m de largura. O canal vertical tem 1.60 m de largura e a abertura deste canal está localizada 2 m abaixo de nível médio da água do mar para que a mesma abertura não se encontre sempre abaixo da superfície da água (Figura 22). A câmara pneumática tem 3.20 m de largura (o dobro da câmara exterior). Relativamente às paredes da estrutura, as externas têm entre 0.50 m e 0.60 m e as interiores 0.35 m de espessura.

Com o objetivo de assegurar a estabilidade global da estrutura e o seu comportamento como uma estrutura monolítica, algumas células são preenchidas com betão e as restantes partes são cheias usando materiais dragados [29].

Com base nos valores estimados pela empresa responsável pela tecnologia REWEC3 (WAVENERGY.IT), espera-se que esta estrutura de 510 m produza, durante um ano, entre 3 000 MWh e 4 500MWh (“*Central Mediterranean Sea: 6 000 - 9 000MWh*”, para uma estrutura de 1km) [28].

A inclusão destas centrais no quebramar origina um acréscimo de 15% no preço de uma solução sem dispositivos de aproveitamento de energia, [29].

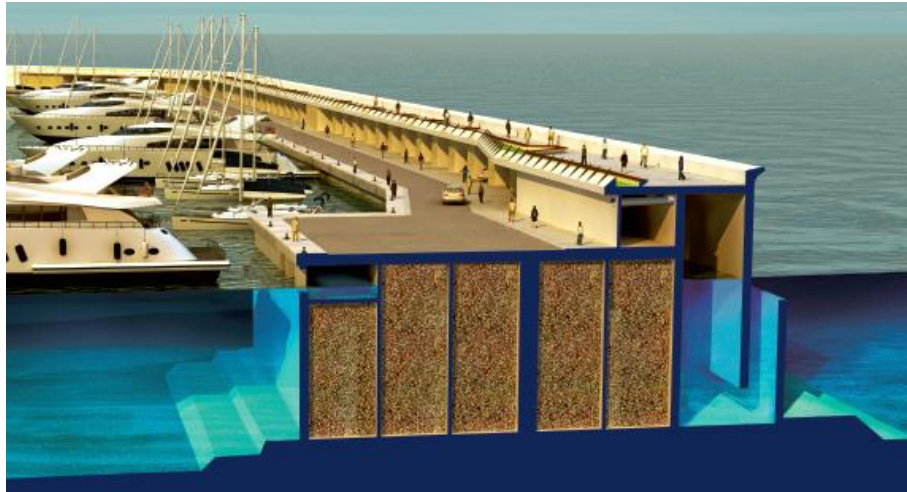


Figura 21 – Representação de uma vista 3D dos caixões REWEC3 [28].

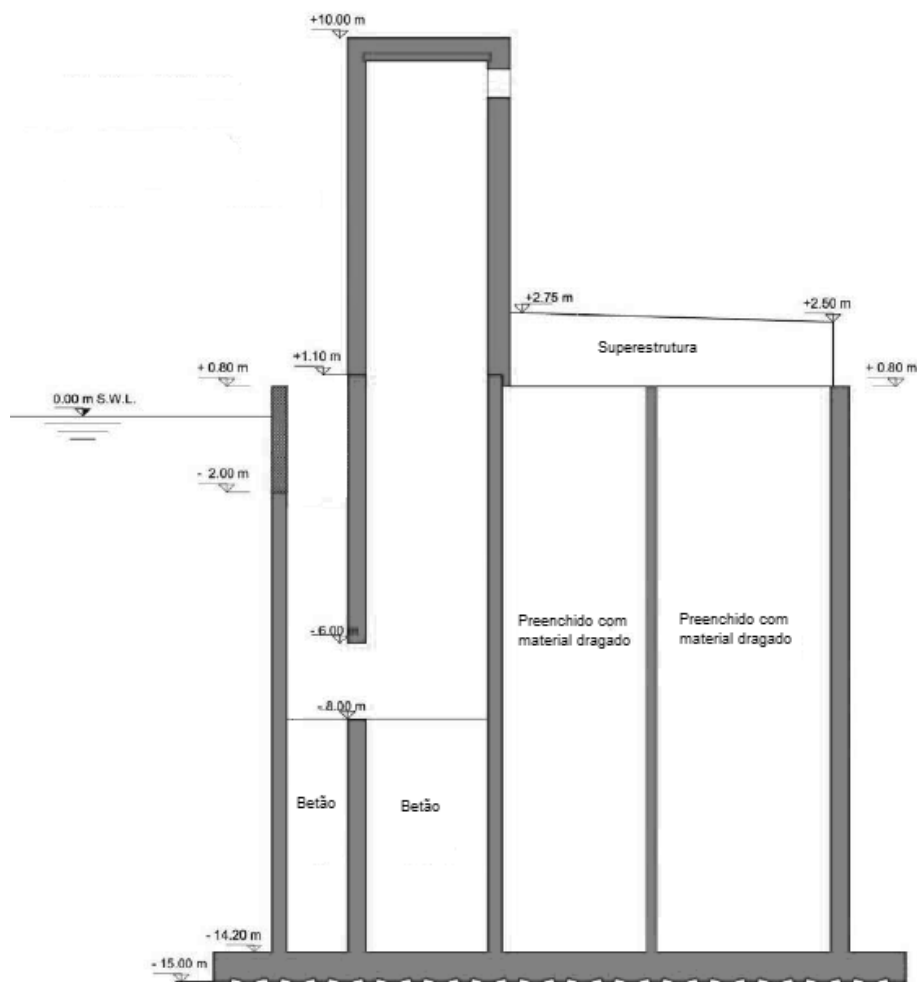


Figura 22 – Desenho da secção transversal tipo dos caixões REWEC3 [29].

2.3.2.5. TAPCHAN

O TAPCHAN (*Tapered Channel Wave Power Device*) (Figura 23), um dispositivo desenvolvido na Noruega nos anos 80, foi a primeira estrutura baseada na tecnologia de galgamento a ser implementada. Um dispositivo com uma capacidade instalada de 350 kW foi construído em 1985 em Toftesfallen, Noruega, e operou até início da década de 90 quando trabalhos que tinham como objetivo otimizar a estrutura destruíram parte da mesma. Depois desse acontecimento não houve fundos suficientes para realizar reparações nem manutenção. O dispositivo é constituído por um canal que se inicia com uma determinada secção e vai estreitando. Esta forma faz com que as ondas à medida que se propagam para a secção mais estreita, aumentam em altura até que atingem a cota máxima das paredes do canal e transbordam para o reservatório. Este reservatório, elevado em relação ao nível do mar, armazena a água com o acréscimo de energia potencial que permite a geração de energia por meio de uma turbina de baixa queda (*Kaplan*) [30], [12].

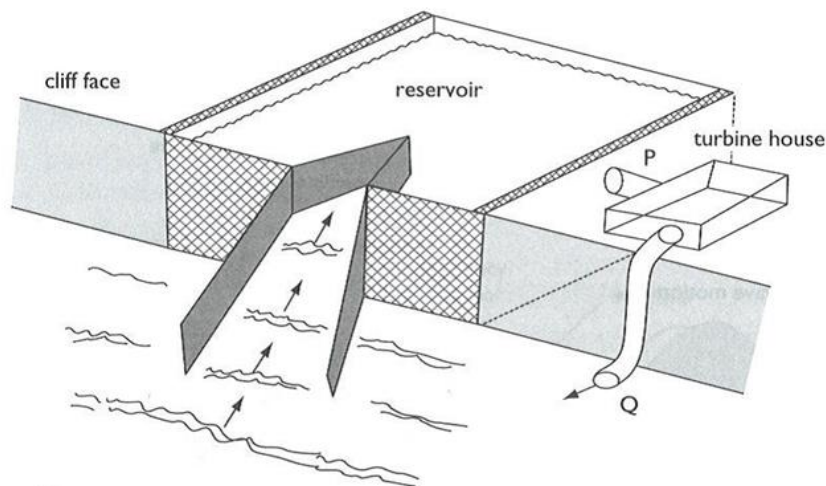


Figura 23 – Esquema representativo do funcionamento do Tapchan [31].

2.3.2.6. SSG – Kvitsøy, Noruega

O SSG (*Sea-wave Slot-cone generator*) é um conversor de energia das ondas por intermédio de galgamentos (*overtopping*). Começou a ser desenvolvido no ano 2003, tem sido melhorado desde então, até que esteve prevista a construção de um projeto-piloto no ano de 2008 na ilha de Kvitsøy, Noruega. A construção não foi realizada por razões sociais (queixa apresentada por um habitante local) [32]. De seguida é apresentado o estudo feito para a realização da estrutura.

O dispositivo destaca-se pela sua robustez, o custo baixo relativamente a outro tipo de centrais e a possibilidade de ser incorporado em quebra-mares (composição de vários módulos instalados lado a lado). Ao ser incluído numa solução de defesa costeira permite a já referida divisão de custos, assim como um melhoramento no desempenho, porque reduz a reflexão devido à absorção de energia [13].

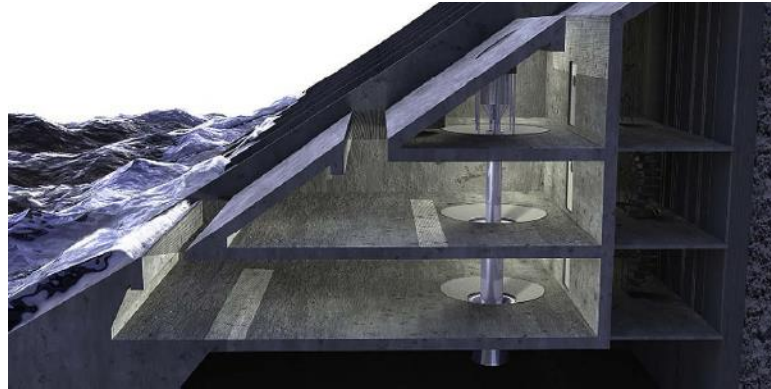


Figura 24 – Secção lateral de um dispositivo SSG com três níveis [13].



Figura 25 – Aplicação do SSG num quebramar [13].

Trata-se de uma estrutura que funciona por galgamento (*overtopping*) o que significa que a estrutura deve ser galgada pelas ondas incidentes para que, durante estes acontecimentos, a água seja capturada a um nível superior ao da superfície do mar. Para evitar que a pressão do ar dentro dos reservatórios obstrua a entrada de água devem ser incluídas várias aberturas de ventilação. A água que é armazenada nos reservatórios, antes de ser devolvida ao mar, passa por turbinas gerando assim energia mecânica. É usado um conjunto de turbinas *Kaplan* reguladas por comportas, que são as únicas partes móveis de toda a estrutura (aspeto importante por funcionar num ambiente marinho, onde as cargas durante eventos extremos podem ser 100 vezes superiores à situação operacional normal).

A otimização da central baseou-se essencialmente na geometria da estrutura e na estratégia utilizada no dimensionamento da turbina. Os comprimentos e inclinação das frentes dos reservatórios, que conduzem a água aos diferentes reservatórios, foram projetados com o objetivo de otimizar a energia capturada e reduzir as ações atuantes na estrutura durante as condições de projeto. As características da agitação marítima e a batimetria do local são variáveis importantes no dimensionamento do paramento frontal dos reservatórios, assim como a proximidade da fundação da estrutura, que pode contribuir para o aumento ou redução do fenómeno de espraçamento. Aspetos como o aumento do volume de armazenamento podem proporcionar menores perdas por transbordamento e custos mais elevados, enquanto o aumento da capacidade da turbina pode resultar num maior consumo de energia gasta nos ciclos de *start/stop* da turbina [13]. Estas questões devem ser estudadas de maneira a obter uma otimização do desempenho da estrutura tendo em conta o investimento envolvido.

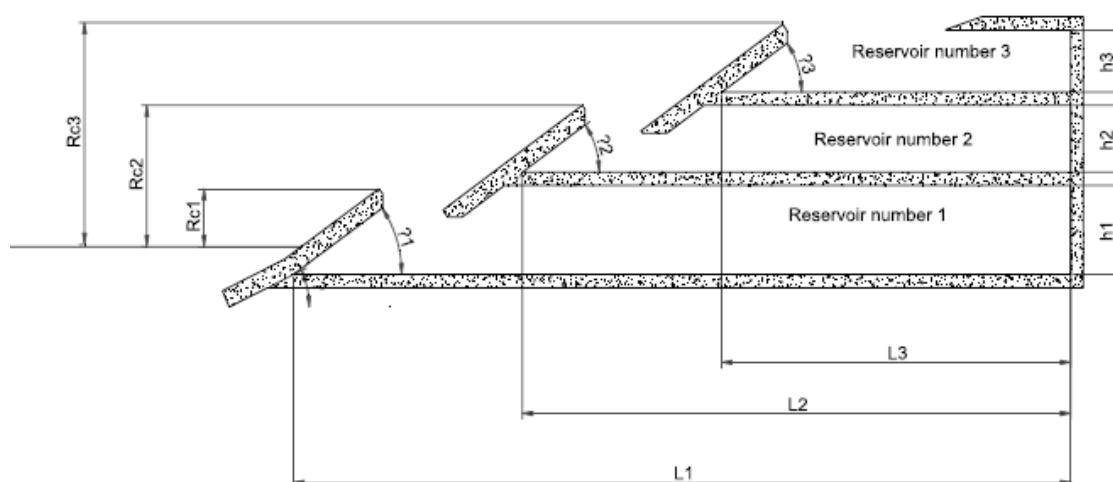


Figura 26 – Esboço das principais dimensões do SSG [13].

A central está projetada para uma vida útil de 25 anos, sendo uma estrutura robusta de betão armado, construída numa linha de costa rochosa. Foi escolhido um *layout* com três reservatórios, com dimensões totais de aproximadamente 17 m de comprimento (L1 na Figura 26), 10 m de largura e 6 m de altura. As dimensões de Rc 1, 2 e 3, (Figura 26) que definem a cota de entrada de água em cada um dos reservatórios, são, respetivamente, 1.5 m, 3 m e 5 m, sendo a inclinação das frentes dos reservatórios igual a 35°. São usadas 4 hidroturbinas *Kaplan* (duas no reservatório inferior e uma nos restantes), com uma capacidade conjunta de 163kW, feitas de aço resistente à corrosão. Espera-se que as turbinas funcionem com elevadas frequências de *start/stop* na ordem dos 2 min. Os geradores estão localizados num nível mais alto de forma a evitar inundações [13].

Tabela 4 - Eficiência parciais estimadas para o dispositivo SSG [13].

Fórmula	Definição	Eficiência (%)
$\eta_{crest} = \frac{P_{crest}}{P_{wave}}$	Eficiência Hidráulica	30 - 40
$\eta_{res} = \frac{P_{res}}{P_{crest}}$	Eficiência do Reservatório	35 – 80
$\eta_{tur} = \frac{P_{tur}}{P_{res}}$	Eficiência das Turbinas	80 – 90
$\eta_{crest} = \frac{P_{gen}}{P_{tur}}$	Eficiência do Gerador	95 – 97
$\eta_{crest} = \frac{P_{output}}{P_{wave}}$	Eficiência Global	10 – 26

Analisando a Tabela 4 conclui-se que as maiores perdas ocorrem no funcionamento hidráulico da estrutura (30-40%) e na recolha de água dos reservatórios (35-80%). O funcionamento hidráulico afeta a conversão da energia da agitação incidente em energia potencial. Por sua vez, a dimensão limitada dos reservatórios e a perda de altura variável ocorrida na entrada da água para os reservatórios levam a algum desperdício da energia potencial. Espera-se uma eficiência total da central entre 10% e 26% relativamente à energia das ondas incidentes. Com base em estudos probabilísticos realizados, [13] relativos à agitação marítima, foi possível prever uma produção anual de sensivelmente 320MWh. O investimento esperado para este projeto é de 20M€ [33].

2.3.2.7. SSG - Expansão do porto de Hanstholm, Dinamarca

O Porto de Hanstholm, na Dinamarca, durante o ano 2008, iniciou um plano de desenvolvimento que envolvia uma enorme expansão. O plano consistia no reforço do tráfego de *ferries*, no aumento do transporte de mercadorias, na exploração de energias renováveis e na manutenção do estatuto de maior porto de pesca do país. Estava prevista a construção de um novo quebramar exterior com um comprimento de 1.5 km, com profundidades de água variáveis entre 8 m e 14 m combinado com estruturas de exploração da energia dos ventos e das ondas. A estrutura escolhida para aproveitar a energia das ondas foi o SSG (Sea-wave Slot-cone Generator) apresentado no ponto anterior.

Foram analisadas duas soluções de caixões muito distintas (inclusive na capacidade instalada) com o propósito de incluir no estudo uma vasta série de alternativas. Os dispositivos foram otimizados com base num detalhado estudo da agitação marítima e batimetria do local [34]. As estruturas foram dimensionadas respeitando os requisitos básicos de quebra-mares em relação ao máximo galgamento aceitável e à estabilidade global da estrutura, consequentemente, as estimativas dos custos obtidos apresentam mais precisão [34].

A solução que se revelou mais proveitosa (Figura 27) é constituída por três níveis de reservatórios e tem uma capacidade instalada de 6.12 kW/m. De acordo com a Figura 26, a estrutura tem $Rc1=1$ m, $Rc2=2.3$ m, $Rc3=3.8$ m e uma altura total de +6.50 m em relação ao nível médio da água do mar. Os comprimentos de cada reservatório são $L_1=25.0$ m, $L_2=20.5$ m e $L_3= 17.0$ m também de acordo com a Figura 26.

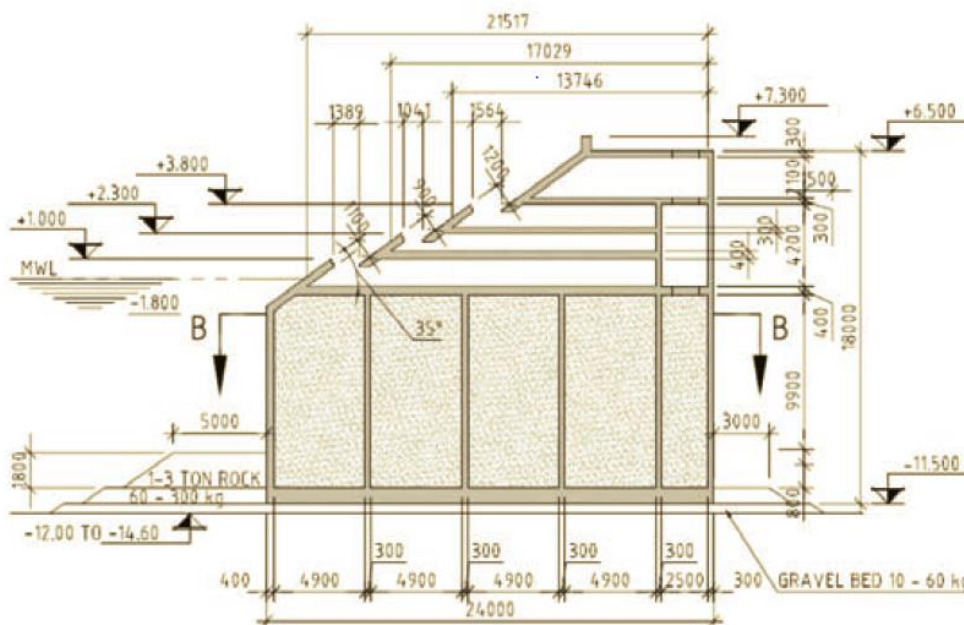


Figura 27 - Secção final SSG de três níveis [34].

Estima-se que as turbinas de baixa queda e o equipamento mecânico necessário para o funcionamento desta central rondem os 14 200€ por metro linear de estrutura. Com o objetivo de avaliar o custo acrescido por se implementar os dispositivos de aproveitamento de energia, avaliou-se em 58 200€/m o custo de um quebramar de taludes tradicional. O custo da solução representada na Figura 27, só considerando a estrutura, é de sensivelmente 80.200€/m. Somando a este o valor das turbinas e equipamentos mecânicos com capacidade de 6.12kW/h, obtém-se o valor de 94.400€/m. Assim,

fazendo a diferença entre os dois valores, chega-se a um custo acrescentado de 36.200€/m (38%). Para um período de retorno de 10 anos, com uma produção anual de esperada de 12.01GWh (8.01MW/ano/m), consegue-se um preço da energia fornecida de 0.45€/kWh [34].

2.3.2.8. Wavestar – Hanthstolm, Dinamarca

O dispositivo *Wavestar* é do tipo *multibody* e durante os últimos dez anos tem vindo a ser desenvolvido como uma tecnologia a implementar *nearshore*. Visto que o dispositivo tem um funcionamento, à parte do método de conversão da energia, semelhante ao desenvolvido no Brasil que foi recentemente incluído num quebramar, segue-se uma caracterização e avaliação de desempenho com o objetivo de obter um caso de comparação da tecnologia *multibody*.

O *Wavestar* consiste em duas filas de flutuadores hemisféricos fixos a uma estrutura sustentada através de pilares de aço com fundações de betão. As componentes móveis que suportam os flutuadores situam-se acima do nível médio da água do mar, Figura 28. Com a passagem das ondas, os flutuadores movem-se para cima e para baixo, consoante estão perante uma crista de onda ou uma cava, gerando energia mecânica para fazer funcionar uma bomba hidráulica que força a entrada de um fluido num circuito hidráulico múltiplo, que por sua vez produz um caudal de óleo de alta pressão relativamente constante. Esse caudal é direcionado para um motor hidráulico que movimenta um gerador elétrico [35].



Figura 28 - Esquema do *Wavestar* em funcionamento [35].

Existe um protótipo do *Wavestar* instalado em Hanstholm que opera desde 2009 até ao presente. Tem uma capacidade instalada de 110 kW, dois flutuadores de 5 m de diâmetro cada, opera para uma altura de onda máxima de 6 m e foi projetado para um período de funcionamento mínimo de 20 anos. No caso de ocorrência de uma tempestade (ondas maiores do que 6 m) o dispositivo recolhe os flutuadores e é elevado em relação ao nível do mar para não sofrer quaisquer danos, Figura 29 [35].



Figura 29 - Protótipo Wavestar na posição de proteção contra tempestades [35].

Na Tabela 5 é possível notar alguma evolução na percentagem de tempo operacional assim como na eficiência do sistema *PTO* (*power take off*) ao longo dos anos de funcionamento do dispositivo. A produção de energia anual, se não se considerar o primeiro intervalo de funcionamento que serviu para fazer os primeiros testes de segurança e algumas afinações, é da ordem dos 25MWh. Se se considerar só os dados referentes ao período de Out/11 até Abr/13 a produção anual de energia sobe para sensivelmente 44MWh o que denota uma clara evolução na otimização da estrutura.

Tabela 5 - Resumo da energia produzida desde a instalação (Setembro 2009) [36].

Período	Tempo Operacional (%)	Tempo de Produção (h)	Energia Hidráulica (MWh)	Energia Elétrica (MWh)	Eficiência do PTO (%)
Set/09 – Abr/10	-	149	0.8	0.2	18.0
Mai/10 – Set/10	45.8	3547	51.6	6.9	13.3
Set/11 – Out/12	66.3	3697	52.8	30.4	57.6
Out/12 – Dez/12	99.4	1805	26.0	15.6	60.1
Jan/13 – Abr/13	90.3	2275	28.1	16.2	57.4
Total	62.8	11473	159.3	69.3	43.5

2.4. ANÁLISE TÉCNICO-ECONÓMICA DA INTEGRAÇÃO DE UM SISTEMA DE APROVEITAMENTO DE ENERGIA DAS ONDAS NUMA INFRAESTRUTURA COSTEIRA

O subcapítulo que se segue tem como objetivo a análise e comparação técnico-económica de uma forma quantitativa e qualitativa das diferentes soluções e tecnologias possíveis para a integração de um sistema de aproveitamento da energia das ondas numa infraestrutura costeira.

Com base nos casos referidos no subcapítulo anterior, apresenta-se uma tabela com um resumo das características (investimento, produção anual e capacidade instalada) dos diferentes casos. O Tapchan não foi considerado devido à falta de dados relativamente ao projeto. Não é apresentada uma comparação extensiva porque os projetos apresentam distintos estados de maturidade. Por exemplo, a central do Pico trata-se de uma infraestrutura construída quase exclusivamente para Investigação e Desenvolvimento. No caso da central de Mutriku verifica-se precisamente o contrário, uma infraestrutura destinada à exploração comercial. O valor do “Investimento”, no caso de dispositivos inseridos em quebra-mares ou outras estruturas de defesa costeira, corresponde ao acréscimo de investimento quando comparado com uma solução tradicional de exclusiva proteção costeira.

Tabela 6 - Tabela resumo de uma análise qualitativa entre as soluções apresentadas.

	Investimento (M€)	Produção anual (MWh)	Capacidade instalada (kW)
Mutriku*	6.4	200 (ano de 2011)	296
Limpet*	N/D	28	500
Pico*	6.5	130	400
REWEC3** (Civitavecchia)	(+15% solução sem dispositivo)	3 000 – 4 500	N/D
SSG Kvitsøy**	20.0	320	163
SSG Hanstholm**	54.3 (incluindo quebramar)	12 000	6.12kW/m x 1500=9180
Wavestar*	N/D	25	110
*Baseado em resultados operacionais		**Baseado em estimativas operacionais	

Considerando não ser fiável uma comparação direta, alguns indicadores podem ser extraídos da Tabela 6. Existe uma tendência indicando que o uso de dispositivos de extração da energia das ondas integrados em estruturas costeiras pode representar uma melhor solução económica. Analisando os valores de MWh/M€ na Tabela 7, ainda que alguns deles sejam baseados em estimativas, é possível concluir que quando o dispositivo de aproveitamento da energia das ondas é inserido numa estrutura costeira a relação aumenta no mínimo 10 unidades. É espectável que um valor da mesma ordem de grandeza, ou ainda maior, fosse apresentado para o caso do REWEC3, visto que o valor estimado da produção anual é bastante similar ao caso do SSG em Hanstholm (no REWEC3 a produção varia entre 3000 e 4500 MWh para 500 m de estrutura que é sensivelmente um terço da produção e comprimento dos valores apresentados para o SSG Hanstholm) e o investimento adicional preciso é menor do que 50% da estrutura original sem o dispositivo. Novamente, o facto de se estar a misturar valores estimados e valores reais medidos deve estar sempre subjacente a esta análise. Como exemplo, o valor estimado para a produção anual da planta de Mutriku era de 600MWh que resultaria num valor de 93MWh/M€, três vezes maior do que os resultados obtidos durante o primeiro ano de funcionamento. Os resultados apresentados são afetados significativamente por outras variáveis, como o recurso, por exemplo.

Tabela 7 - Rácio entre a “Produção Anual” e o “Investimento” total.

Produção anual / Investimento (MWh/M€)	
Mutriku	31
Pico	21
SSG Kvitsøy	16
SSG Hanstholm	221

O facto de as soluções integradas apresentarem melhores indicadores não é uma completa surpresa visto que o investimento preciso para a construção da estrutura é de uma maneira geral o investimento dominante de todo o processo. A título de exemplo, segundo a *Crown State* na Figura 30, é possível observar que num dispositivo OWC, o investimento que diz respeito à estrutura representa cerca de 66% do custo total, [24].

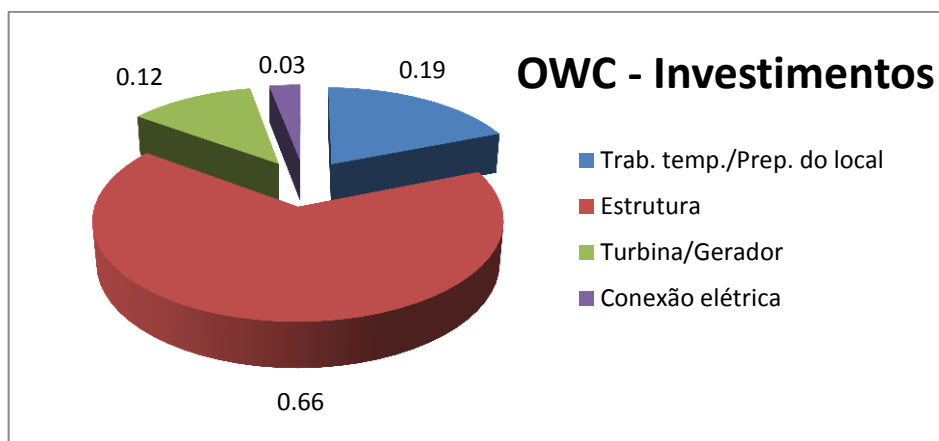


Figura 30 – Divisão de custos de um dispositivo OWC, adaptado de [24].

Em forma de conclusão pode-se afirmar que a projeção de dispositivos integrados em estruturas de defesa costeira deve ser equacionada nos futuros investimentos em engenharia. Porém, a viabilidade deste tipo de soluções é altamente dependente das especificidades do local de implementação.

Por forma a analisar tecnicamente/qualitativamente as três tecnologias, OWC/U-OWC, *overtopping* e *multibody*, segue-se uma caracterização de cada uma com vantagens e desvantagens no aproveitamento de energia das ondas em estruturas costeiras.

Tabela 8 - Caracterização qualitativa de cada uma das tecnologias [37].

	OWC / U-OWC	Galgamento (<i>Overtopping</i>)	Multibody
Pontos Fortes	<ul style="list-style-type: none"> • Pode ser construído por módulos • <i>Output</i> energético relativamente constante • Construção relativamente barata 	<ul style="list-style-type: none"> • Recolhe energia que solicitaria o quebramar • Pode ser construído por módulos • Permite a renovação da água na zona limitada (reduz a poluição) • Menor impacto visual (menor cota do coroamento) • Pressões provocadas pela ação do mar na face inclinada favorecem a estabilidade global da estrutura • Questões de projeto arquitetónico e técnicas estimuladoras de inovação/desenvolvimento 	<ul style="list-style-type: none"> • É construído por módulos • Versatilidade de adição ou remoção de módulos
Pontos Fracos	<ul style="list-style-type: none"> • Na presença de condições marítimas severas, podem ocorrer estragos na turbina por inundação • Dificuldade associada às obras de construção civil • Redução na amplitude do movimento da coluna de água para períodos de onda afastados do dimensionamento • Grandes amplitudes de maré alteram a frequência de funcionamento e eficiência • Poluição sonora 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensível à direção variável da agitação marítima • Grandes amplitudes de maré prejudicam o nível de galgamento • Sedimentação no interior dos reservatórios • Gestão complexa do funcionamento das comportas que controlam o caudal turbinado • Inexistência de dispositivos construídos 	<ul style="list-style-type: none"> • Impacte visual • Afeta a navegabilidade na zona • Perante agitação extrema precisa de parar o funcionamento e ser protegido

Com apoio nas análises efetuadas, é perceptível que o aproveitamento da energia das ondas por meio de galgamentos (*overtopping*), associada ao dispositivo SSG (Sea-wave Slot-cone Generator), é promissor. Os estudos realizados, com estimativas de produções anuais e investimentos iniciais de projetos de quebra-mares incorporando dispositivos SSG, revelam uma possível concorrência com a tecnologia OWC ou U-OWC, que se encontra num nível de desenvolvimento superior. No entanto, a inexistência de qualquer tipo de estrutura de aproveitamento de energia baseada no fenómeno de galgamento, dificulta a comparação com os restantes tipos de extração da energia das ondas *onshore*. Assim, devem ser efetuados mais estudos com o objetivo de sustentar a construção de um projeto piloto ou central com fins comerciais de produção de energia com base no fenómeno do galgamento.

O aproveitamento da energia das ondas por *overtopping* (nomeadamente o dispositivo SSG) converte a energia recolhida em forças de estabilização da estrutura total (Tabela 8), aumentando assim os coeficientes de segurança globais. A capacidade referida, aliada à necessidade de reforço de alguns quebra-mares existentes, quer devido ao desgaste quer devido à incapacidade de responder às alterações climáticas que se repercutem em condições de agitação marítima mais graves, podem levar a prolongamentos de quebra-mares através da implementação de dispositivos SSG, aliando assim o aumento da segurança com a implementação de um dispositivo de produção de energia elétrica através de uma fonte renovável.

Assim, com base nas análises efetuadas, desenvolve-se no presente trabalho um modelo de aplicação do aproveitamento da energia das ondas através do galgamento (SSG), com o objetivo de evidenciar e desenvolver as potencialidades desta tecnologia.

2.5. SISTEMA SSG – SEA-WAVE SLOT-CONE GENERATOR

2.5.1. INTRODUÇÃO

O conceito *Sea-wave Slot-cone Generator* (SSG) foi desenvolvido pela empresa WAVEenergy (Stavanger, Noruega) [38]. Como já foi referido neste Estado da Arte da presente dissertação, trata-se de um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas por galgamento, que utiliza um número de reservatórios sobrepostos, onde a água é armazenada na forma de energia potencial, sendo depois utilizada para fazer operar turbinas.

O sistema tinha, até ao ano de 2012, sido submetido a seis anos de I&D no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aalborg (Dinamarca). A investigação focou-se maioritariamente na maximização da captação da energia das ondas incidentes e na natureza e intensidade das solicitações provocadas pelas ondas na estrutura. Para além destes dois, foi dada alguma atenção à investigação das questões técnicas e económicas relacionadas com a possibilidade da integração do SSG no corpo de estruturas tradicionais de proteção de portos [38].

Nas seguintes secções será apresentada uma revisão dos resultados mais relevantes da investigação levada a cabo, permitindo obter uma perspetiva do presente estado atual de conhecimento da tecnologia.

2.5.2. COMPORTAMENTO HIDRÁULICO

2.5.2.1. Galgamento

A geometria exterior do dispositivo SSG (Figura 31) foi projetada com o objetivo de otimizar a eficiência hidráulica, isto é, maximizar a energia capturada para diferentes estados de mar (agitação marítima e nível de maré). A eficiência deste tipo de conversores (definida na secção 2.5.4. Eficiência e produção de energia, com mais pormenor) é altamente dependente da quantidade de água armazenada através do galgamento. O rácio entre o volume de água capturada no reservatório j por unidade de largura para um determinado estado de mar e a duração desse mesmo estado de mar é chamado “caudal de galgamento médio”, $q_{ov,j}$. Este rácio representa uma variável fundamental no dimensionamento do dispositivo SSG.

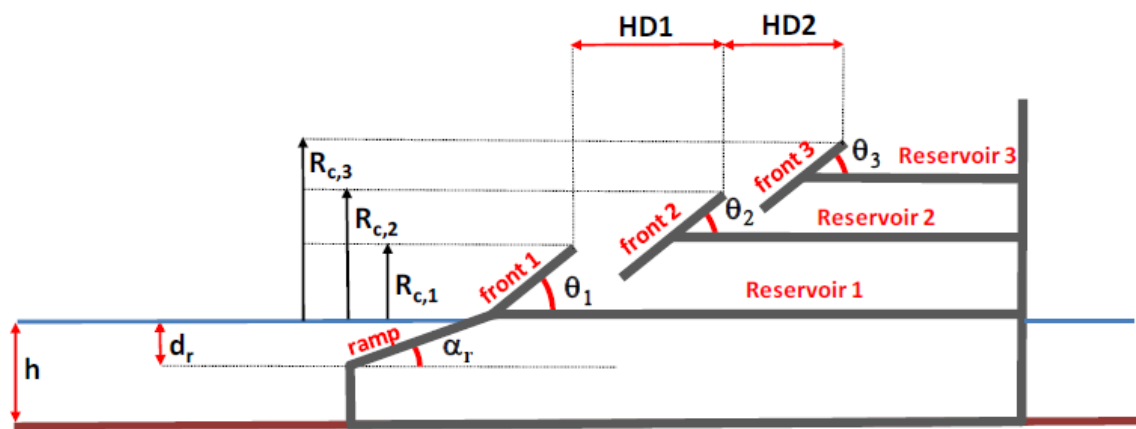


Figura 31 – Esquema de projeto de uma estrutura com 3 níveis de reservatórios, [38].

Com o propósito de estabelecer equações fiáveis que descrevessem como a variação de maré e os parâmetros da geometria exterior afetam $q_{ov,j}$, foram realizados trabalhos experimentais entre 2004 e 2007 no Laboratório de Hidráulica e Engenharia Costeira da Universidade de Aalborg. Os testes foram executados com ondas irregulares, em condições 2D e 3D, com escalas a variar de 1:15 até 1:60. No caso dos testes 2D, foram testadas 30 geometrias distintas o que permitiu investigar a influência das seguintes variáveis (relativas à Figura 31):

- Altura de onda significativa, $H_{m0,t}$;
- Níveis de entrada nos reservatórios, $R_{c,j}$;
- Ângulo da rampa, α_r ;
- Altura da rampa, d_r ;
- Ângulo das frentes, θ_j ;
- Distância horizontal entre cristas de reservatórios, HD_j .

O efeito da incidência da agitação marítima para diferentes direções foi estudado posteriormente por meio de ensaios 3D considerando o projeto-piloto que seria instalado na ilha de Kvitsøy, Noruega.

Por meio dos ensaios realizados com ondas 2D foi possível obter os resultados que se seguem.

A altura de onda significativa junto da estrutura, $H_{m0,t}$, como seria de esperar, é dos fatores que mais influência o caudal de galgamento médio, $q_{ov,j}$, em cada reservatório. Na Figura 32 é possível observar que o aumento da variável $H_{m0,t}$ conduz ao aumento de $q_{ov,j}$. Contudo, as linhas de tendência de cada reservatório apresentam diferentes configurações. Para o reservatório mais baixo, Res.1, a curva é convexa, enquanto para o reservatório mais alto, Res.3, o caudal aumenta, em média, mais rapidamente com a altura de onda e de forma não linear, [38]. A presença das frentes dos reservatórios limita o volume de água que os reservatórios inferiores são capazes de armazenar visto que obstruem de certa forma a entrada de água. Esta diminuição deve-se ao facto da presença das frentes inclinadas diminuir a área de entrada de água nos reservatórios.

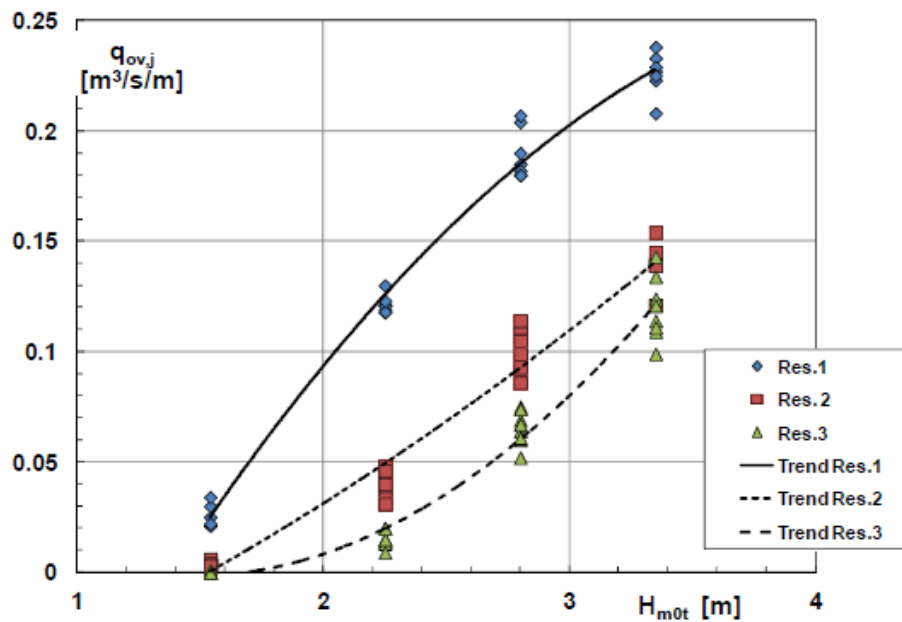


Figura 32 – Caudal de galgamento em função da altura de onda significativa, [38].

No que diz respeito à geometria do dispositivo, o nível da entrada dos reservatórios, $R_{c,j}$, é a variável que tem mais relevância na alteração do volume armazenado em cada reservatório. O caudal de galgamento médio reduz-se mais do que linearmente quando o nível da entrada dos reservatórios aumenta. Este comportamento é mostrado na Figura 33, que se refere a duas estruturas que diferem unicamente no nível da crista do reservatório inferior ($R_{c1}=2.25m$ em “D” e $R_{c1}=1.5m$ em “E”), [38]. Contudo, ao reduzir o nível da entrada dos reservatórios, obrigatoriamente, reduz-se também a altura de queda da água armazenada, apesar de aumentar a quantidade de água recolhida porque se as entradas dos reservatórios se encontram a uma cota inferior, maior é o número de ondas que alcança a mesma cota. Assim, o efeito da variável em causa na eficiência hidráulica (secção 2.5.4. Eficiência e produção de energia) deriva de um equilíbrio entre o caudal armazenado e altura de queda respetiva, [38].

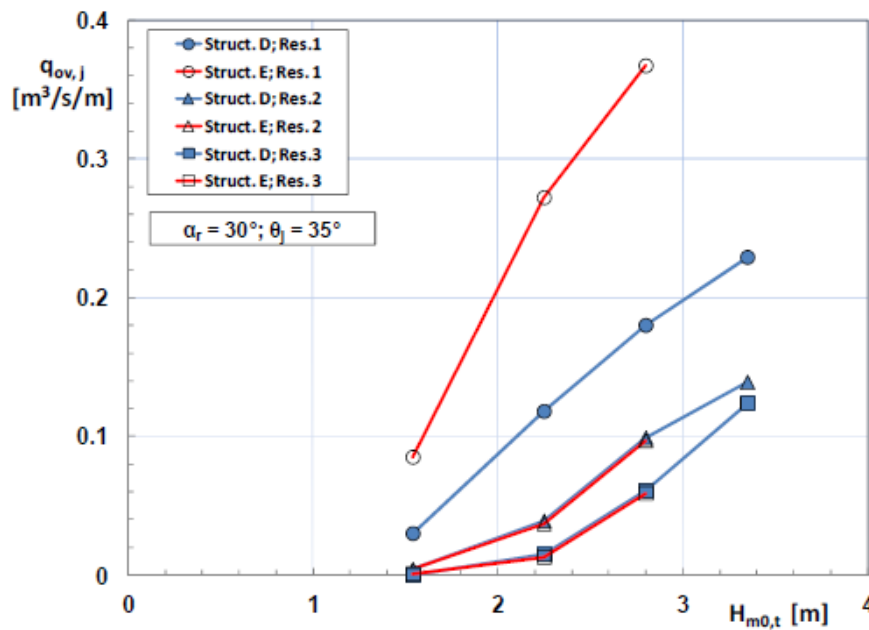


Figura 33 – Efeito do nível da crista do reservatório no galgamento, [38].

Em relação à variável d_r , correspondente à profundidade abaixo do nível médio da água do mar da rampa de aproximação à estrutura, sabe-se que quanto maior esta for, maior será o rácio de galgamento $((q_{ov,j}/g H_{m0,t})^{0.5})$. Na Figura 34 é ilustrada a influência desta variável através da comparação de valores do rácio de galgamento de estruturas idênticas mas com diferentes valores de d_r . O aumento do rácio de galgamento para um aumento da profundidade da rampa é explicado pelo facto do “degrau” vertical refletir parte da onda incidente, evitando que esta se envolva no processo de galgamento. A linha a tracejado na Figura 34 representa a variação da eficiência hidráulica (η_{Hyd}). No caso experimental em causa foi possível obter um aumento progressivo da eficiência hidráulica de 5% desde $d_r/h=0.375$ até $d_r/h=1$, [38].

Quanto à influência do ângulo da rampa de aproximação, α_r , são apresentados na Figura 35 resultados da eficiência hidráulica (η_{Hyd}) para vários estados de mar, expressos em $H_{m0,t}/h$. São comparadas três curvas que representam estruturas que diferem unicamente no ângulo α_r para conseguir avaliar esta componente em particular. Analisando as três curvas do gráfico é possível identificar que em todas elas a eficiência hidráulica sofre um decréscimo para $H_s/h=0.56$ devido à ocorrência de rebentação na aproximação ao dispositivo. Analisando o desenvolvimento das curvas, é possível concluir que o ângulo de 19° apresenta melhores resultados de eficiência e que não existe grande diferença entre a inclinação de 30° e 35° , [38]. Contudo, uma inclinação de 19° pode levar a que algumas das ondas rebentem em forma de ondas mergulhantes. As ondas mergulhantes caracterizam-se pela ocorrência de uma deformação bastante saliente da crista da onda, Figura 36. A deformação é tal que se verifica o desenvolvimento de uma bolsa de ar (tubo) até que ocorre uma espécie de colapso. O impacto do volume de água gerado por este colapso gera uma turbulência que acaba por reduzir o potencial energético da onda o que é prejudicial ao espraçamento.

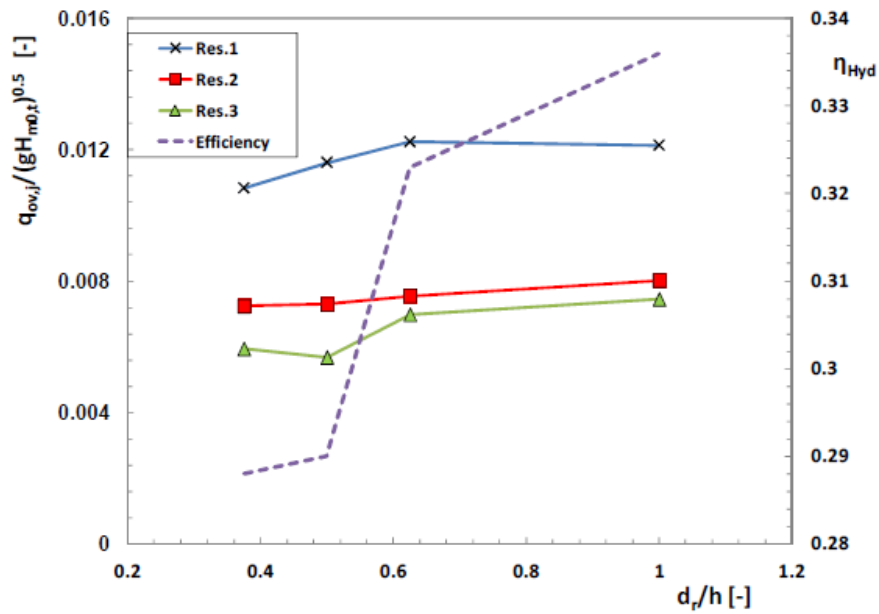


Figura 34 – Efeito da profundidade da rampa no rácio de galgamento e na eficiência hidráulica, [38].

Por forma a maximizar o espraçamento das ondas incidentes deve-se assegurar que a rebentação é de fundo ou ascendente, que é caracterizada pelo adiantamento da zona inferior da onda o que causa a diminuição e desaparecimento da crista (Figura 36) evitando assim o desperdício de energia que ocorre no “mergulho” da crista. Assim, e de acordo com esta observação experimental, concluiu-se que o valor do ângulo da rampa de aproximação que proporciona ondas de fundo/ascendentes é 35° . Seguindo o mesmo raciocínio, propõe-se que o mesmo ângulo seja usado também nas frentes dos reservatórios ($\theta_j=35^\circ$).

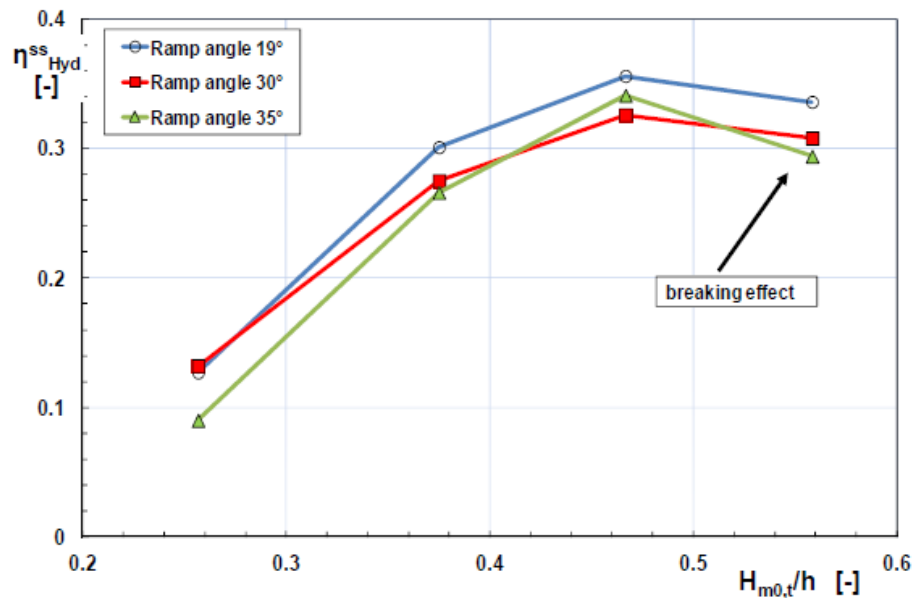


Figura 35 – Efeito do ângulo da rampa de aproximação na eficiência hidráulica (η_{Hyd}), [38].

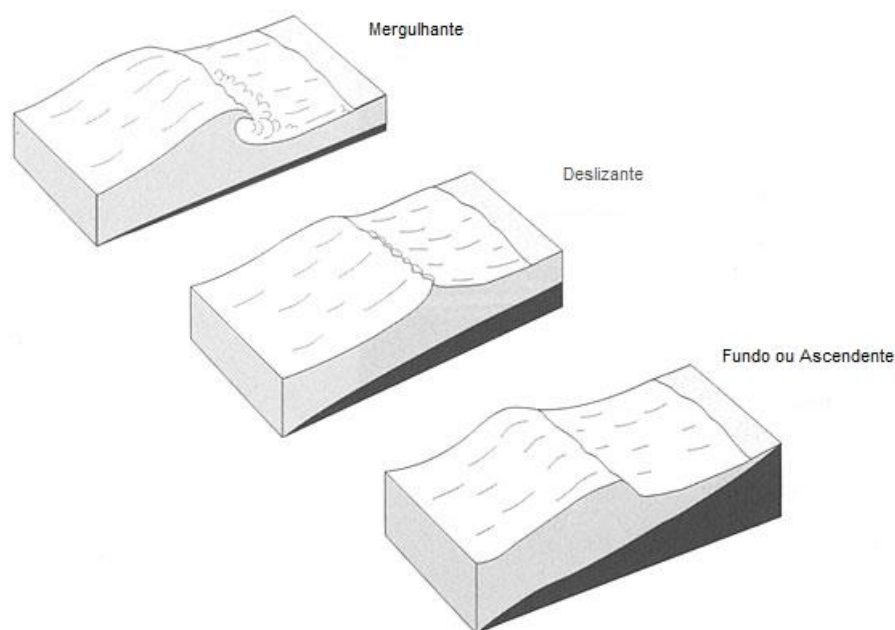


Figura 36 – Tipos de rebentação de ondas na linha de costa, [38].

Por último foi também avaliada a influência da variável HD_j no desempenho do dispositivo. Esta variável influencia a quantidade de água armazenada nos reservatórios por galgamento. No reservatório inferior o volume de água armazenado aumenta quando a distância horizontal (HD_j) aumenta enquanto no reservatório superior a quantidade de água diminui quando HD_j aumenta. Para valores de HD_1 muito elevados a estrutura passa mesmo a comportar-se como uma estrutura de um reservatório só, [38] visto que a água incidente é toda recolhida no primeiro reservatório.

Passando à análise do efeito da direção da agitação marítima, sabe-se que a incidência de ondas oblíquas pode reduzir significativamente o volume de água de galgamento numa estrutura costeira, [38]. Quanto à ocorrência de *short-crested seas*, ou seja de ondas irregulares com crista curta, não é bem clara a forma como estas alteram o fenómeno de espraçamento e galgamento. Para avaliar a influência da incidência oblíqua e da ocorrência de *short-crested seas* foram levados a cabo testes experimentais no tanque do Laboratório de Hidráulica e Engenharia Costeira da Universidade de Aalborg. Foi reproduzida a estrutura concebida para o projeto piloto de Kvitsøy a uma escala de 1:60 e submetida a ensaios de ondas irregulares frontais com cristas longas, frontais com cristas curtas e oblíquas com cristas longas (obliquidade entre -15° e $+15^\circ$ em relação à direção frontal). Analisados os dados, foi possível concluir que ambas as variáveis (obliquidade da incidência e ocorrência de *short-crested seas*) limitam volume de galgamento, [38]. Esta limitação é relativamente pequena para os dois reservatórios inferiores (cerca de 10%) mas bastante relevante para o superior (cerca de 35%). A redução do caudal médio de galgamento reduz a eficiência hidráulica (η_{Hyd}) do dispositivo e dado que a maior redução ocorre no reservatório mais alto, que possui a maior carga hidráulica, o decréscimo na eficiência pode ser maior do que o do caudal de galgamento. Foi estimado que a incidência oblíqua e a ocorrência de estados de mar com cristas curtas, em conjunto, possam diminuir até 50% a eficiência hidráulica, [38].

O comportamento do dispositivo em relação ao galgamento pode ser otimizado por meio da utilização de equações de dimensionamento. O volume de água armazenada nos reservatórios de um dispositivo SSG pode ser calculado através da integração da seguinte equação [38],

$$\frac{dq}{dz} = \left(\prod_j \lambda_j \right) \cdot \sqrt{g \cdot H_{m0,t}} \cdot A \cdot e^{B \cdot \frac{z}{H_{m0,t}}} \cdot e^{C \cdot \frac{R_{c,1}}{H_{m0,t}}} \quad (1)$$

em que dq/dz representa a taxa de variação do caudal de galgamento, por unidade de largura, relativamente a uma coordenada vertical, z , medida a partir do nível médio da água do mar. Para além da altura da onda incidente, $H_{m0,t}$ a equação (1) inclui três coeficientes empíricos, A , B e C , que dizem respeito a uma configuração padrão [38]. O uso da equação anterior para qualquer formato diferente do padrão deve ser ajustado através da multiplicação por um produtório de fatores de correção, λ_j . Com base na mesma fórmula pode ainda ser estimado o volume de água que entra no reservatório j , por meio da integração entre os níveis da crista dos reservatórios $R_{c,j}$ e $R_{c,j+1}$:

$$q_{ov,j} = \int_{R_{c,j}}^{R_{c,j+1}} \frac{dq}{dz} dz = \left(\prod_j \lambda_j \right) \cdot \sqrt{g \cdot H_{m0,t}}^3 \cdot \frac{A}{B} \cdot e^{C \cdot \frac{R_{c,1}}{H_{m0,t}}} \cdot \left(e^{B \cdot \frac{R_{c,j+1}}{H_{m0,t}}} - e^{B \cdot \frac{R_{c,j}}{H_{m0,t}}} \right) \quad (2)$$

Os trabalhos experimentais mencionados sugeriram, para a configuração padrão com $d_r/h=1$ e $\alpha_r=\theta_j=30^\circ \sim 35^\circ$, os seguintes valores para os coeficientes empíricos:

- $A = 0.197$
- $B = -1.753$
- $C = -0.408$

Em relação aos fatores de correção, λ_j a maior parte dos casos de divergência em relação à configuração padrão foi avaliado individualmente, ou seja, num determinado ensaio um único parâmetro foi variado enquanto os outros se mantiveram constantes. Assim, devem ser realizados estudos para investigar a validade do produtório (π) de coeficientes de correção apresentado nas equações (1) e (2) porque a sobreposição de diferentes parâmetros foi avaliada para poucas situações. Uma análise mais detalhada sobre os coeficientes de correção pode ser encontrada em [38].

2.5.2.2. A importância da maré

Os estudos apresentados anteriormente focaram-se principalmente no efeito da geometria e de parâmetros relacionados com a onda no funcionamento do dispositivo SSG. Em cada uma dessas experiências a altura de água no local foi mantida constante e não foi obtida qualquer informação sobre a importância da maré. Para colmatar esta falha foram realizadas simulações numéricas utilizando o programa *WOPsim3.01 (Wave Overtopping Power Simulation)* que é capaz de simular uma estrutura SSG, com um determinado número de reservatórios e uma configuração de turbina para cada um desses reservatórios. O programa produz uma série de caudais de galgamento e estima a energia produzida pelas turbinas [38].

Assim, considerando um formato padrão de três reservatórios para o SSG simulou-se [38] a implementação desta estrutura em Swakopmund (Namíbia), Sines (Portugal) e no Mar do Norte (Dinamarca). Para cada um destes locais o estado de mar era conhecido, incluindo alturas de ondas, períodos de onda e níveis de maré.

Para cada estado do mar, o nível da entrada dos reservatórios foi otimizado através da maximização da eficiência hidráulica, assumindo a inexistência de maré. Obtidos os níveis dos reservatórios, as estruturas foram submetidas aos mesmos estados do mar mas desta vez incluindo a maré. A eficiência hidráulica foi recalculada e a relação entre esta e a eficiência hidráulica calculada anteriormente foi considerada como um indicador da influência da maré no desempenho do SSG.

Na Figura 37 é apresentada a evolução da relação entre a eficiência hidráulica sem a variação de maré e a mesma eficiência considerando a variação de maré. O gráfico mostra que o desempenho do dispositivo é prejudicado com o aumento da variação da maré. Em média, de acordo com a projeção numérica, uma perda na eficiência da ordem dos 10% é atingida para valores da variação de maré de 1.6m (aproximadamente metade da variação de maré de Swakopmund e Sines. Posteriormente verificou-se que se os níveis da entrada dos reservatórios ($R_{c,j}$) forem otimizados tendo em conta também a variação da maré pode ser obtida uma eficiência hidráulica (η_{Hyd}) superior (ganho de cerca de 3 % quando comparado com a otimização somente considerando o estado do mar). Concluindo, pode-se dizer que a variação dos níveis da água do mar pode afetar significativamente a resposta hidráulica do SSG.

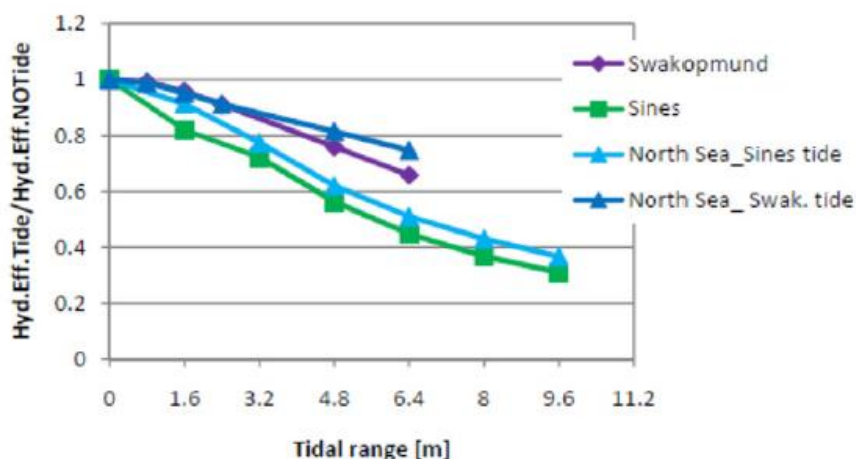


Figura 37 – Decréscimo da eficiência hidráulica com o aumento da variação da maré [38].

O decréscimo no desempenho do dispositivo SSG devido à variação de maré pode ser minorado através da adição de um ou mais reservatórios. Foi realizado um estudo para diferentes estados do mar e variações de maré, para avaliar a sua influência na eficiência hidráulica (Figura 31 e Figura 38). Em média foi observado um ganho de 5% na alteração de dois para três reservatórios, 3% de três para quatro e 2% de quatro para cinco. Para o caso de ocorrência de variação de maré observou-se que para um determinado estado de mar, os ganhos na eficiência hidráulica são maiores com o aumento da variação de maré, ou seja, quando maior for a variação do nível de maré mais vantajosa se torna a utilização de mais um reservatório [38].

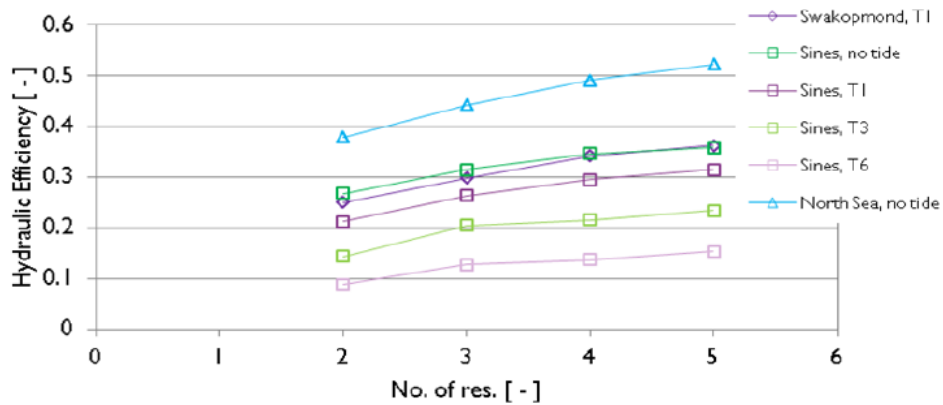


Figura 38 – Efeito do número de reservatórios na eficiência hidráulica, [38].

2.5.2.3. Comportamento em relação à reflexão

Como foi referido anteriormente, a rampa de aproximação deve apresentar inclinações consideráveis para proporcionar a ocorrência de rebentação do tipo ascendente. Contudo, as inclinações referidas conduzem a elevados coeficientes de reflexão. A ocorrência de reflexões pode afetar a estabilidade da estrutura devido à maior possibilidade de ocorrência de problemas de erosão na fundação da mesma. Depois de realizados estudos concluiu-se que o dispositivo SSG reflete entre 45% e 90% da agitação incidente [38].

2.5.3. COMPORTAMENTO ESTRUTURAL

Ao contrário das tradicionais estruturas de defesa costeira, o SSG necessita de estar exposto a níveis elevados de agitação marítima. Por conseguinte, os critérios de dimensionamento utilizados para as estruturas tradicionais podem não ser adequados quando se dimensiona este tipo de estruturas mais inovadoras. Testes experimentais realizados comprovam que as ações atuantes no dispositivo SSG podem exceder (entre 20% a 50%) as previsões da equação de Goda para quebramares verticais, [38]. Este fato leva a concluir que são necessários mais trabalhos de investigação nesta área com o objetivo de desenvolver uma ferramenta adequada para o dimensionamento estrutural de SSG's.

2.5.4. EFICIÊNCIA E PRODUÇÃO DE ENERGIA

A conversão da energia das ondas para energia elétrica no dispositivo SSG pode ser dividida em quatro etapas principais que se apresentam de seguida.

- Da onda para a entrada dos reservatórios, que consiste na captura das ondas nas diferentes alturas de entrada dos reservatórios, R_{cj} . A potência teórica da onda, por metro de comprimento da crista, para ondas regulares, foi determinada pela expressão (3)

$$P_{wave} = \frac{\rho g H^2}{8} C_g \quad (3)$$

em que ρ representa a massa volúmica da água, H a altura de onda e C_g a velocidade de grupo de ondas.

Na presença de agitação irregular a potência do estado de mar pode ser calculada através da equação (4)

$$P_{wave} = \rho g \int_0^{\infty} C_g(f) \cdot S(f) df \quad (4)$$

em que $S(f)$ representa a densidade de energia da onda para a frequência, f .

A potência disponível quando a onda é capturada na entrada dos reservatórios, depende do caudal médio de galgamento ($q_{ov,j}$), do nível da entrada dos reservatórios (R_{cj}) e das constantes aceleração da gravidade (g) e massa volúmica da água do mar (ρ) e é dada por,

$$P_{crest} = \sum_{j=1}^{N_{res}} q_{ov,j} \cdot R_{c,j} \cdot \rho \cdot g \quad (5)$$

A relação entre as duas potências apresentadas corresponde à eficiência hidráulica (η_{Hyd}) que representa a passagem de potência da onda para potência no nível de entrada dos reservatórios, ou seja, com base em medições realizadas nos testes mencionados concluiu-se que aproximadamente 40% da energia das ondas seria capturada, [38].

$$\eta_{Hyd} = \frac{P_{crest}}{P_{wave}} \quad (6)$$

- Da entrada dos reservatórios para o seu interior: consiste na perda de energia potencial da água devido à queda desta do nível da entrada dos reservatórios para o seu interior (nível mais baixo). À relação entre a potência disponível no interior do reservatório e a potência capturada na entrada dos reservatórios dá-se no nome de eficiência do reservatório (η_{res}). Estimou-se que a eficiência do reservatório seja da ordem dos 75%, [38].
- Turbinas de baixa queda: a água em forma de energia potencial é utilizada para fazer girar as turbinas. Esta conversão é afetada pela eficiência das turbinas (η_{tur}) que ronda os 90%, [38].
- Gerador elétrico e equipamento elétrico: A rotação da turbina faz operar um gerador elétrico que transforma a energia mecânica em energia elétrica. A eficiência do gerador (η_{gen}) é aproximadamente de 95% [38].

No fim, a eficiência global do dispositivo ($\eta_{overall}$), que traduz a passagem de energia das ondas para energia elétrica, estima-se que seja entre 25% e 35%, [38].

2.5.5. POWER TAKE-OFF (PTO)

No retorno ao mar, a água armazenada passa por turbinas de baixa queda especialmente dimensionadas gerando eletricidade. A energia extraída de um determinado volume de água é diretamente proporcional à sua elevação acima do nível do mar.

Um conceito inovador de nome “*Multi-Stage Turbine*” (Figura 39) está a ser desenvolvido para os projetos SSG em particular. Consiste num número de turbinas (dependente do número de reservatórios) posicionadas no mesmo eixo que, em conjunto, fazem operar um único gerador. As

turbinas estão interligadas por meio de dutos concêntricos. Tirando vantagem da utilização de diferentes alturas de água, o conjunto *Multi-stage Turbine* permite minimizar os ciclos de arranque/paragem do gerador e opera mesmo quando um único reservatório fornece água, [38]. Outra possibilidade de geração de energia passa pela utilização de quatro turbinas Kaplan (para uma estrutura de três reservatórios) do mesmo tamanho. Duas das turbinas seriam localizadas no reservatório inferior e uma em cada um dos restantes reservatórios. As turbinas em causa devem ser fabricadas usando aço resistente à corrosão [38].

Para regular o caudal a fluir a cada turbina são instaladas comportas cilíndricas diretamente conectadas às turbinas. As comportas selam através do contacto entre o metal das mesmas com o metal do anel exterior da turbina e quando levantadas permitem a passagem da água que faz operar a turbina. Os geradores são localizados num nível superior para evitar o risco de cheias, [38].

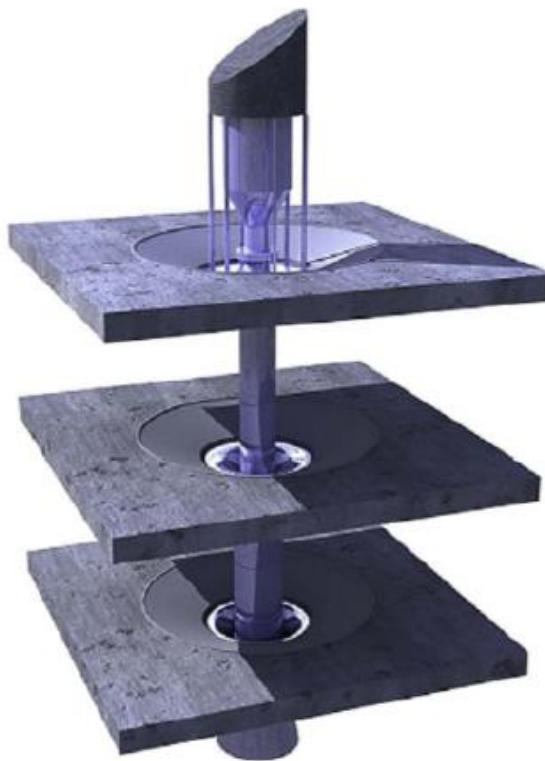


Figura 39 – *Multi-stage Turbine* com três níveis, [13].

3

CASO DE ESTUDO

3.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os vários aspetos relacionados com a execução dos ensaios de laboratório (equipamentos, modelo, procedimentos, entre outros) realizados para avaliar o desempenho do dispositivo de conversão da energia das ondas.

Inicialmente são apresentados os elementos teóricos em que se baseia a modelação física de conversores de energia das ondas. De seguida são descritas as instalações onde foram realizados os ensaios (tanque de ondas, sistema de geração de onda, entre outros) e é caracterizado o modelo físico construído à escala. Além disso é descrito o dispositivo experimental, o procedimento experimental e os estados de mar ensaiados. Por fim, são referidos os parâmetros utilizados para a análise de resultados e os resultados obtidos.

3.2. MODELAÇÃO FÍSICA

3.2.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A modelação física baseia-se no conceito da semelhança. Os modelos à escala, quando solicitados por uma determinada ação, devem responder de uma forma semelhante à correspondente ao protótipo ou ao modelo. Assim, uma vez conhecido o comportamento de um determinado modelo físico, é possível obter a resposta do protótipo através da aplicação de um conjunto de fatores de escala, [39].

Para que exista uma semelhança total entre o modelo e o protótipo é necessário que se respeitem três tipos de semelhanças: semelhança geométrica, semelhança cinemática e semelhança dinâmica.

A semelhança geométrica estabelece que a relação entre comprimentos correspondentes do modelo físico e do protótipo deve ser constante, sendo essa relação designada por escala geométrica N_L :

$$N_L = \frac{L_P}{L_M} \quad (7)$$

Em que L_M representa um comprimento no modelo físico e L_P o comprimento homólogo no protótipo.

A semelhança cinemática inclui a semelhança de movimentos entre as partículas do modelo e do protótipo. Esta é verificada se partículas correspondentes alcançarem no modelo e no protótipo pontos correspondentes em instantes correspondentes. De outra forma, a semelhança cinemática é garantida se o modelo e o protótipo forem geometricamente semelhantes e se a relação entre tempos correspondentes no modelo físico e no protótipo, denominado fator de escala de tempos N_T seja constante,

$$N_T = \frac{T_P}{T_M} \quad (8)$$

em que T_P representa um tempo cinemático no protótipo e T_M o tempo cinemático correspondente no modelo físico.

Por fim, a semelhança dinâmica estabelece que a relação entre as forças a atuar em pontos correspondentes do modelo e do protótipo seja a mesma. Os quatro tipos de forças exteriores atuantes: gravidade, viscosidade, tensão superficial e elasticidade devem apresentar a mesma relação. A última condição não é habitualmente possível de satisfazer e por isso é necessário definir um critério de semelhança dinâmica parcial no qual devem apenas ser consideradas as forças com maior relevância no estudo em causa.

No âmbito da engenharia costeira/marítima, o critério de semelhança mais importante e mais utilizado é o critério de semelhança de Froude, [40]. O número de Froude expressa a relação entre as forças de inércia e as forças de gravidade, ou seja,

$$F_r = \frac{\sqrt{\text{Forças de gravidade}}}{\sqrt{\text{Forças de inércia}}} = \frac{\rho L^2 V^2}{\sqrt{\rho L^3 g}} = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (9)$$

em que L representa um comprimento característico, g a aceleração da gravidade, V uma velocidade característica e ρ massa volúmica de fluido.

O critério de Froude é respeitado quando o número de Froude do modelo físico (F_{rM}) e o número de Froude do protótipo (F_{rP}) são iguais,

$$F_{rM} = F_{rP} \rightarrow \left(\frac{V}{\sqrt{gL}} \right)_M = \left(\frac{V}{\sqrt{gL}} \right)_P \quad (10)$$

Se a expressão anterior for apresentada em termos de fatores de escala, obtém-se:

$$\frac{N_V}{\sqrt{N_g N_L}} = 1 \quad (11)$$

Visto que a aceleração da gravidade no modelo e no protótipo é igual, o que significa $N_g = 1$, obtém-se a seguinte simplificação:

$$N_V = \sqrt{N_L} \quad (12)$$

Sendo a velocidade, a relação entre o espaço e o tempo, então o fator de escala respeita a seguinte relação:

$$N_V = \frac{N_L}{N_T} \quad (13)$$

Conciliando as equações anteriores é possível expressar uma relação entre o fator de escala de tempos cinemáticos e o fator de escala geométrico:

$$N_T = \sqrt{N_L} \quad (14)$$

O modelo físico do SSG (Sea-wave Slot-cone Generator) em estudo foi construído de acordo com o critério de semelhança de Froude, tendo em conta as dimensões do tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e respeitando a capacidade do sistema de geração de agitação marítima presente nas mesmas instalações. Com as condicionantes referidas presentes decidiu-se a construção com o seguinte fator de escala geométrica.

$$N_T = 40 \quad (15)$$

Definida a escala geométrica, foi possível obter os restantes fatores de escala correspondentes às dimensões utilizadas nos ensaios, Tabela 9.

Tabela 9 – Fatores de escala das diferentes variáveis consideradas nos ensaios.

Dimensão	Modelo	Protótipo	1:40
Comprimentos	1	N	40
Tempo	1	$N^{0.5}$	6.32
Volume	1	N^3	64 000
Massa	1	N^3	64 000
Caudal	1	$N^{2.5}$	10 119.29
Potência	1	$N^{3.5}$	404 771.54

3.2.2. EFEITOS DE ESCALA

Os modelos de dispositivos de conversão da energia das ondas que respeitam a semelhança de Froude, como o caso de estudo, podem ser afetados por efeitos de escala significativos. Isto deve-se ao facto de não respeitarem a igualdade dos números de Weber (tensão superficial), Reynolds (viscosidade), Cauchy (elasticidade) ou Euler (pressão ou compressibilidade) entre o modelo e o protótipo [41]. Efeitos de viscosidade resultam em maiores perdas energéticas no modelo quando comparado com o protótipo, o que leva a energias medidas, regra geral, subestimadas. Os efeitos de tensão superficial são particularmente importantes na geração de ondas de pequena altura e comprimento e resultam geralmente em alturas de onda relativamente menores quando comparadas com as do protótipo. Para além de influenciarem a altura de onda, afetam a semelhança em casos de profundidade baixa, por exemplo em estudos de galgamento ou espraçamento. Devido aos efeitos de elasticidade, os materiais escalados geometricamente apresentam um comportamento demasiado rígido no modelo e deveriam ser substituídos por materiais com um módulo de Young (E) menor. Efeitos de compressibilidade são relevantes para o ar dentro de uma câmara de um dispositivo de coluna de água oscilante, por exemplo, que pode comportar-se demasiadamente rígido e distorcer a oscilação da água quando comparada com o protótipo [41].

A ocorrência de efeitos de escala é mais importante com o aumento do fator de escala geométrica. Contudo, não é possível estabelecer um valor limite para o fator de escala geométrica abaixo do qual seria possível desprezar os efeitos de escala. A importância dos efeitos de escala depende do tipo de fenómeno ou parâmetro que se estuda num determinado modelo, visto que a importância relativa das forças envolvidas pode variar. Assim, se um parâmetro, como por exemplo a altura de onda significativa, não é afetado consideravelmente por efeitos de escala não significa necessariamente que os restantes parâmetros, como por exemplo a energia, não sejam também afetados. Ou seja, cada fenómeno ou parâmetro em particular carece de uma avaliação crítica de efeitos de escala [41].

3.3. INFRAESTRUTURA DE ENSAIOS

Os ensaios experimentais foram realizados no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da SHRHA da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). A infraestrutura é constituída pelo tanque de ondas, pelo sistema de geração de ondas (a azul na Figura 40), a sala de controlo onde é possível controlar o sistema de geração de ondas e recolher dados, um fosso no centro do tanque, uma ponte rolante que abrange toda a área de trabalho e uma praia de dissipação de ondas para minimizar as reflexões, Figura 40.

As dimensões principais do tanque são $28 \times 12 \times 1.0 \text{ m}^3$ como é possível observar na Figura 40.

O sistema de geração de ondas, *HR Wallingford (UK)*, permite a simulação de vários tipos de estados de mar 2D e 3D. O equipamento é composto por uma unidade de controlo, juntamente com sistemas informáticos, ou seja, *softwares* de geração e de aquisição e análise de sinal, pela máquina de geração colocada no interior do tanque e por sondas de níveis hidrodinâmicos para medição instantânea da elevação da superfície livre, [42]. As suas principais características são:

- Movido por ação de motores elétricos;
- Opera em profundidades até 1m;
- Tem incorporado um sistema ativo de absorção de reflexão;
- Permite a geração de ondas de crista longa (2D) ou crista curta (3D), para estados de mar regulares e irregulares;
- Possui um *software* de aquisição e análise de dados que permite que sejam efetuadas análises espectrais, estatísticas e de reflexão permitindo ainda uma fácil exportação de dados para posterior tratamento.

O sistema de geração é composto por duas unidades modulares (6 m), com oito pás cada (0.75 m), o que a torna versátil podendo ser movimentada no interior do tanque. As pás são revestidas a fibra de vidro, com movimento independente entre si, permitindo assim a geração de ondas provenientes de diferentes direções (através do funcionamento como batedor do tipo serpente). Por de trás das pás existe ainda um material plástico reticulado e esponjoso que tem como função absorver ondas e reflexões indesejadas, [42].

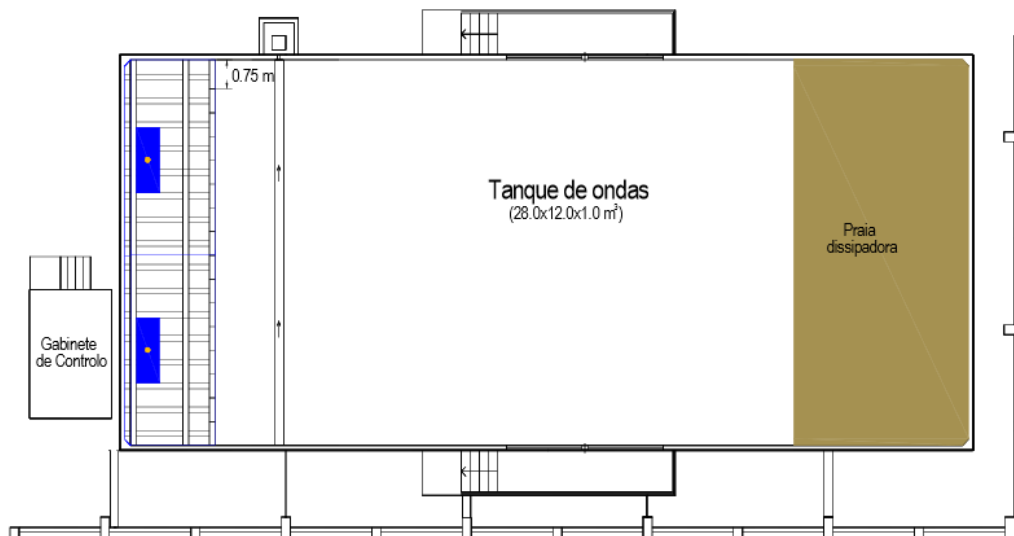


Figura 40 – Vista em planta do tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da FEUP, [42].

3.4. MODELO

O modelo construído trata-se de uma reprodução de um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas através do galgamento. É baseado na tecnologia SSG já existente e descrita em pormenor no Estado da Arte do presente trabalho. Nessa mesma descrição é realçada a importância da eficiência hidráulica deste tipo de dispositivo, que é um fator determinante na viabilidade da operacionalidade da tecnologia SSG. Assim, o desenvolvimento do modelo a ensaiar foi realizado com o objetivo principal de estudar uma forma de otimizar essa eficiência hidráulica.

O modelo consiste num caixão similar aos caixões de betão normalmente utilizados na construção de quebra-mares verticais onde é incorporado o dispositivo de aproveitamento da energia das ondas (similar ao caso de Hanstholm apresentado em 2.3.2.7. SSG - Expansão do porto de Hanstholm, Dinamarca). É dividido em três secções ao longo da sua largura e o aproveitamento de energia encontra-se incorporado na secção do meio. A geometria do dispositivo (Figura 41 e Figura 42) resulta de uma conjugação de conclusões obtidas em diversos estudos sobre a tecnologia SSG.

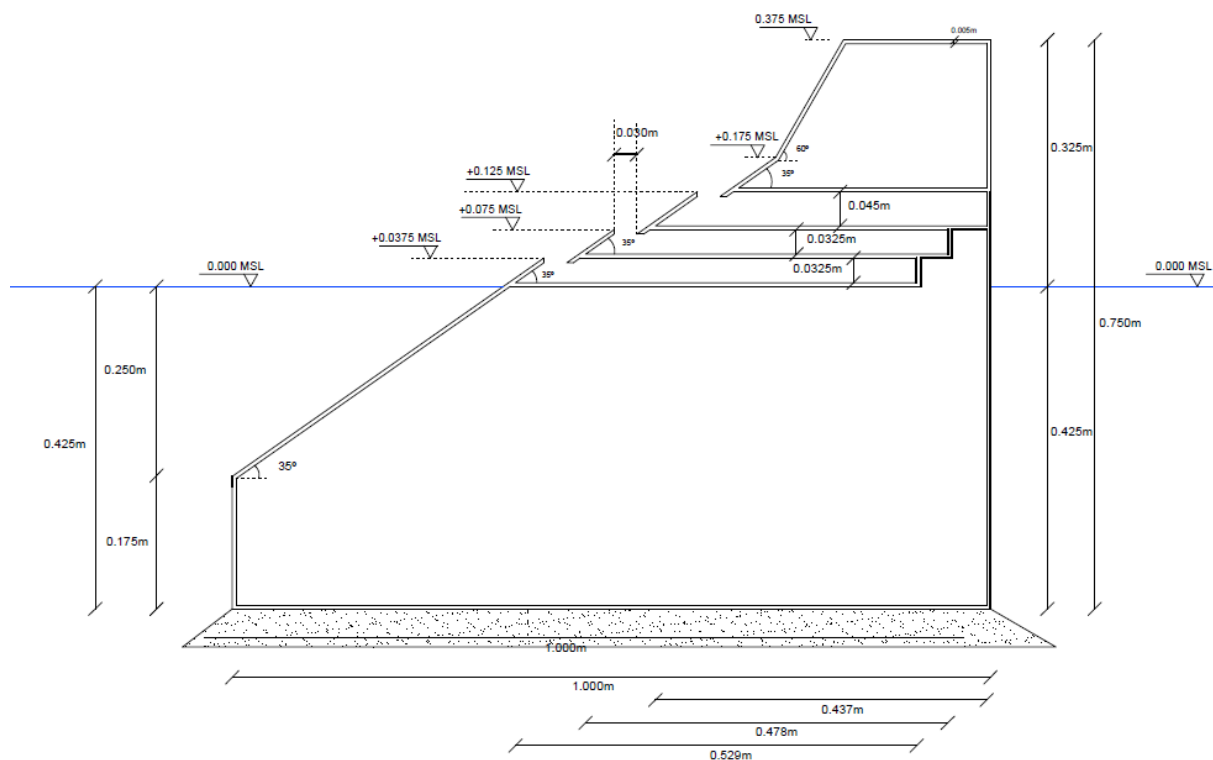


Figura 41 - Geometria da secção de aproveitamento de energia em dimensões de modelo.

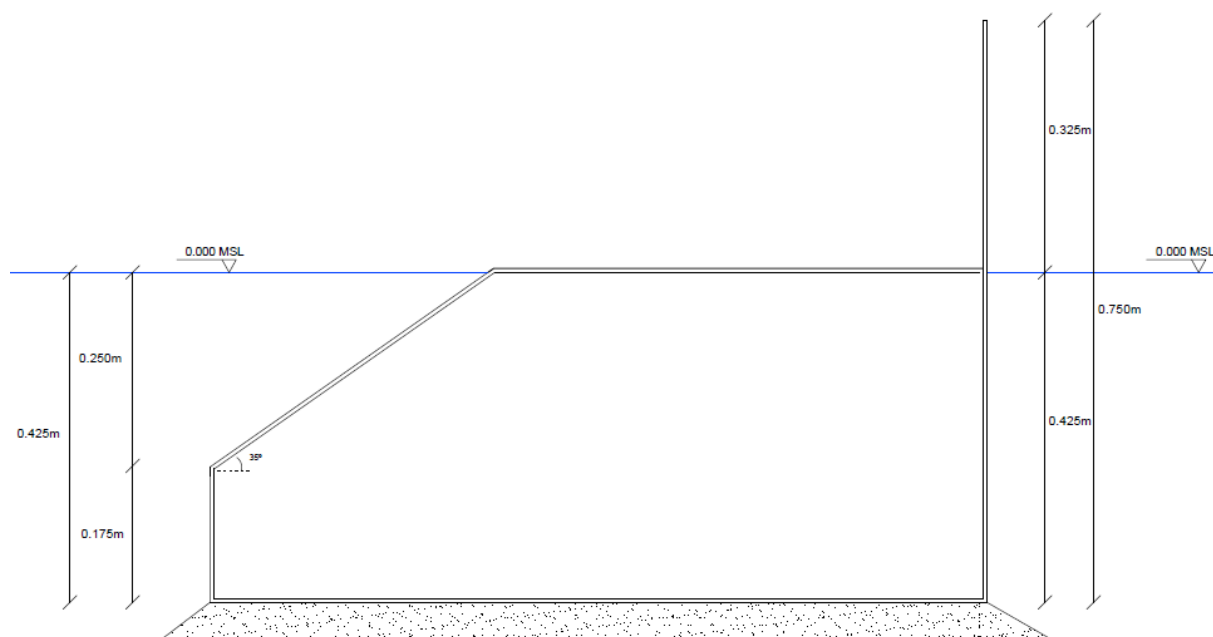


Figura 42 - Geometria das secções laterais do caixão em dimensões de modelo.

Segue-se uma descrição e justificação das medidas utilizadas para o modelo apresentado.

- A estrutura tem 40m de base (1.00m em dimensões do modelo);
- A largura total da estrutura é de 30m dos quais 10m correspondem à secção central onde se encontra o SSG;
- A cota do coroamento é, em medidas do protótipo, +15.0 ao MSL que corresponde sensivelmente à cota do coroamento do quebramar norte do Porto de Leixões;
- O ângulo da rampa de aproximação é 35° porque evita a ocorrência de ondas mergulhantes que conduzem a um menor espriamento e consequentemente menor energia de galgamento;
- O ângulo das frentes dos reservatórios é também de 35° pela mesma razão;
- A distância horizontal entre frentes dos reservatórios é de 1.20m porque deve ser entre uma a duas vezes o valor da altura de onda significativa do estado de mar mais provável, [34] (os estados de mar considerados são apresentados na secção 3.6. Programa de ensaios);
- A estrutura contém três reservatórios com os níveis $R_{c1}=1.5\text{m}$, $R_{c2}=3.0\text{m}$ e $R_{c3}=5.0\text{m}$ que são os níveis considerados para o projeto piloto a instalar em Kvitsøy, Noruega;
- Os comprimentos dos reservatórios do modelo não retratam exatamente a realidade do protótipo. Por razões funcionais os dois reservatórios inferiores foram diminuídos, Figura 41. Assim, os comprimentos dos reservatórios no protótipo são $L_1=24.80\text{m}$; $L_2=21.00\text{m}$ e $L_3=17.40\text{m}$.
- Nas secções laterais da estrutura são simuladas, simplificadamente, as reflexões de um quebramar tradicional através da utilização de tetrápodes adequados à escala utilizada.

No Anexo A são apresentadas mais peças desenhadas do modelo (plantas, vistas, entre outros).

Com o objetivo de aumentar a eficiência do dispositivo de conversão da energia das ondas foram dimensionados “concentradores” que têm o objetivo de aumentar a energia de galgamento. Consistem em paredes verticais que são um prolongamento das paredes verticais laterais do dispositivo e conduzem as ondas de uma maior largura de frente à secção central de aproveitamento de energia. Os concentradores têm 0.3 m de comprimento no modelo que corresponde a 12.0 m no protótipo, tendo sido desenvolvidos com três orientações diferentes (30°, 40° e 50°, Figura 44) e duas configurações por forma a avaliar qual a combinação que conduz à melhor eficiência. Na primeira configuração (C2) os concentradores mantêm ao longo do seu desenvolvimento a cota das paredes verticais laterais (+8.00m ao MSL em medidas do protótipo) e na segunda configuração (C3) os mesmos vão reduzindo a sua cota linearmente de acordo com a inclinação da rampa de aproximação (paralelamente), Figura 43. A configuração C1 corresponde à situação onde não estão aplicados os concentradores. Na Tabela 10 são apresentadas as diferentes combinações possíveis e as suas características. Para os diferentes ângulos dos concentradores a largura de captura do dispositivo (w), que corresponde ao comprimento de frente de estrutura na qual incidem as ondas para aproveitamento de energia, é alterada. Quanto maior o ângulo, maior é a largura de captura (Tabela 11).

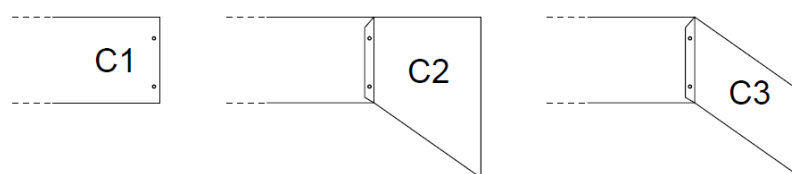


Figura 43 – Vista em perfil da situação sem concentradores e das duas configurações com concentradores.

Tabela 10 – Características das diferentes combinações de concentradores

Combinação	Ângulo (°)	Configuração
0C1	0	C1
30C2	30	C2
30C3	30	C3
40C2	40	C2
40C3	40	C3
50C2	50	C2
50C3	50	C3

Tabela 11 – Valores da largura de captura para os diferentes ângulos.

Ângulo	w (m)
0°	10.0
30°	21.6
40°	25.0
50°	28.0

Idealizado todo o modelo e as suas variantes passou-se à sua materialização. Começou por se decompor a estrutura em duas partes: uma estrutura em chapa de aço quinada e soldada que serve de base a uma estrutura formada por peças de policarbonato coladas entre elas que reproduz a tecnologia SSG com os três reservatórios. Os concentradores foram desenhados como uma terceira parte distinta da estrutura porque havia a necessidade de estes serem móveis para conseguir avaliar as diferentes combinações independentemente. Foram materializados através de doze chapas de aço quinadas (um par por cada combinação) que são aparafusadas às paredes verticais laterais do dispositivo SSG, Figura 43. Na Figura 45 é apresentada uma imagem do projeto, para a construção do modelo, realizado com recurso ao *software* SolidWorks com todos os pormenores, como encaixes, orifícios para escoamento da água, diferentes concentradores, etc (Anexo A12, A13 e A14). Na Figura 46 observa-se o modelo construído.

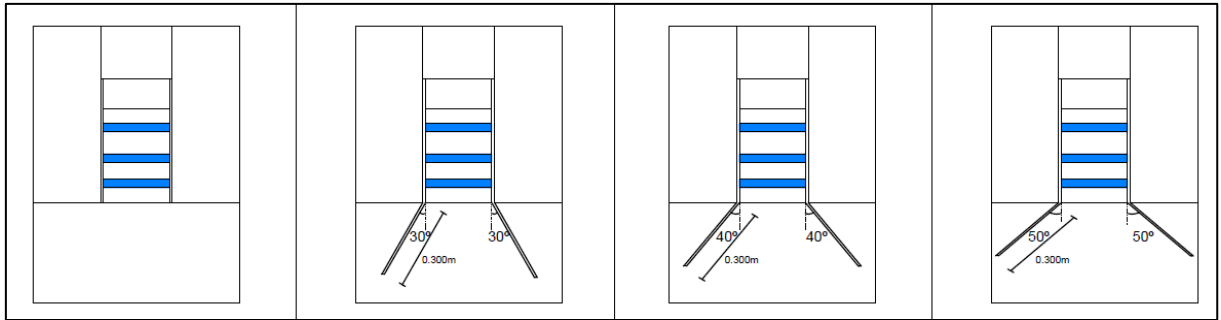


Figura 44 – Plantas dos diferentes ângulos dos concentradores com as medidas de modelo.

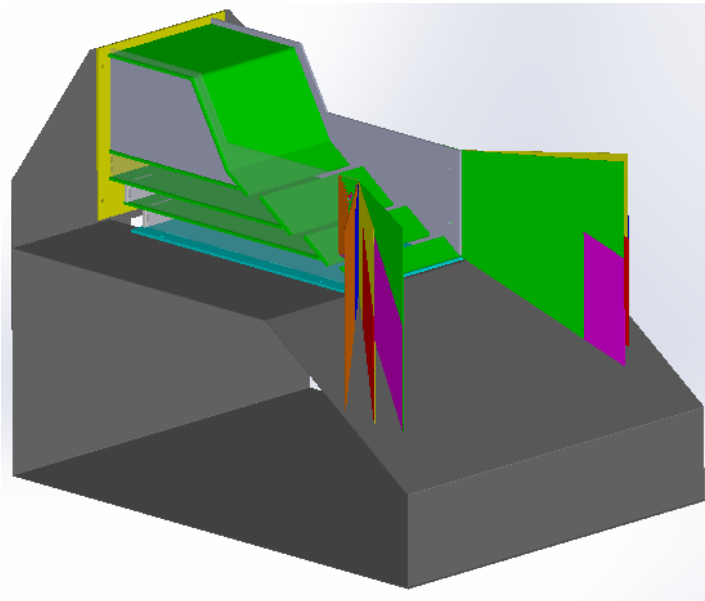


Figura 45 – Estruturação do modelo através do software SolidWorks.



Figura 46 – Fotografias do modelo construído; à esquerda a estrutura por inteiro; à direita o pormenor do dispositivo SSG.

3.5. INSTALAÇÃO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.5.1. INSTRUMENTAÇÃO

3.5.1.1. Sondas de níveis hidrodinâmicos

Para registar as variações do nível de água foram utilizadas sondas de nível do tipo resistivo, Figura 47 e Figura 48. Estas sondas baseiam o seu princípio de operação na medição da corrente elétrica que passa através das duas varetas paralelas de aço inoxidável que se encontram submersas na água. A corrente elétrica que passa através das mesmas é proporcional à profundidade de submersão das sondas e esta corrente é convertida num valor de voltagem também proporcional à profundidade de submersão.

Visto que o sinal de saída das sondas é em unidades de voltagem, este deve ser convertido em unidades geométricas, para assim obter um registo da superfície livre. Para tal deve ser utilizada uma curva de calibração que resulta de um processo de calibração das sondas. Esta curva é assumida como linear e relaciona o sinal em volts com o sinal em unidades geométricas. A metodologia de calibração consiste na colocação do sensor na posição zero e ajuste do sinal de voltagem a 0 V; de seguida posiciona-se o sensor por exemplo 4cm abaixo da posição zero e é registado o valor devolvido em volts; repete-se o procedimento anterior mas desta vez com um posicionamento acima da posição zero; por fim, com as três posições registadas, o *software* de aquisição de dados fornece uma reta de calibração de acordo com o processo realizado.



Figura 47 – Sondas de nível grandes com maior amplitude de medição.



Figura 48 – Sondas de nível pequenas com menor amplitude de medição.

3.5.1.2. Sistema de medição de caudal

Os ensaios têm uma duração que varia desde os cinco minutos, no caso das ondas regulares, até aos vinte minutos para o caso das ondas irregulares. Com estes tempos de duração de ensaios o volume dos reservatórios da estrutura SSG não é suficiente para armazenar todo o caudal de galgamento. Assim, foi necessário implementar um sistema de medição de caudal na parte de trás da estrutura ao qual será ligado cada um dos reservatórios do dispositivo.

O sistema de medição de caudal consiste em três reservatórios auxiliares, ligados a cada um dos reservatórios na secção de testes, nos quais é realizada a medição da quantidade de água que entrou no sistema de geração de energia. A medição propriamente dita é realizada através da recolha do tempo de funcionamento de uma bomba que vai esvaziando os reservatórios auxiliares. Sabendo o tempo de funcionamento da bomba ao longo de todo o ensaio, admitindo que a bomba funciona a um caudal constante, é possível obter um volume de água recolhido por cada um dos reservatórios. É importante que a recolha de dados seja feita individualmente para cada um dos reservatórios porque os diferentes níveis a que cada um se encontra representam diferentes potências conseguidas.

Os três reservatórios auxiliares foram materializados por meio de três recipientes de 50l (Figura 49) reutilizados de uma indústria. Houve a necessidade de furar estes recipientes para poder ligar os mesmos à estrutura através de mangueiras flexíveis de grande diâmetro. As tampas de cada recipiente serviram de suporte ao restante material necessário para medir o caudal.



Figura 49 – Recipientes utilizados como reservatórios auxiliares.

Para que a bomba não funcionasse ao longo de todo o ensaio foi preciso idealizar um sistema de controlo de nível no interior dos recipientes. Este sistema tem como objetivo controlar os arranques e paragens da bomba instalada. Isto é, quando a água no recipiente atinge um determinado nível (superior) o sistema de controlo arranca a bomba que se mantém em funcionamento até a água atingir um definido nível (inferior), momento em que o sistema de controlo desliga a bomba. Assim consegue-se que a bomba funcione exclusivamente entre dois níveis de água definidos admitindo-se que ao longo desse mesmo funcionamento a bomba operou com um caudal constante. O sistema de controlo foi produzido recorrendo a um relé de nível (controlador de nível) que com o auxílio de três sondas de diferentes comprimentos (Figura 50), definidos mediante os níveis entre os quais se quer manter a bomba em funcionamento, efetua os arranques e paragens da bomba descritos anteriormente.



Figura 50 – Sistema de controlo no nível de água nos reservatórios auxiliares.

Por fim, para recolher o tempo de funcionamento da bomba, foi instalado em cada um dos recipientes um sensor de nível mais pequeno (Figura 48) do que os utilizados para medir o nível de água no tanque de ondas (Figura 47). Através das séries temporais registadas pelo sensor de nível é possível calcular o somatório do tempo de funcionamento da bomba. Quando a série apresenta uma inclinação negativa significa que o nível dentro do reservatório está a baixar, ou seja a bomba encontra-se em funcionamento. Assim, o somatório de todo o tempo em que a série apresenta uma inclinação negativa corresponde ao tempo de funcionamento da bomba ao longo do ensaio.

De maneira a conhecer exatamente o caudal de funcionamento das bombas utilizadas (Figura 51), foram levados a cabo quatro ensaios nos quais a bomba funcionou unicamente entre os níveis definidos pelo sistema de controlo de forma a simular uma situação real de ensaio. Foi registado o tempo de funcionamento da bomba necessário para bombear um determinado caudal, diferente em cada um dos ensaios.



Figura 51 – Bombas utilizadas na medição de caudal.

Na Tabela 12 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados para avaliar o desempenho das bombas. Obteve-se um caudal médio de funcionamento da bomba de $q_b=0.50\text{L/s}$. Este valor permite conhecer o caudal turbinado em cada ensaio para cada um dos reservatórios, baseado no tempo de funcionamento de cada sistema de bombagem que por sua vez é recolhido por meio das séries temporais.

Tabela 12 – Resultados obtidos nos ensaios realizados às bombas.

Ensaio	Litros (L)	Tempo (s)	Caudal (L/s)	Caudal (m ³ /s)
1	30	62	0.48	0.00048
2	60	117	0.51	0.00051
3	45	89	0.51	0.00051
4	36	72	0.50	0.00050
Média			0.50	0.00050

3.5.2. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Os trabalhos experimentais foram realizados num canal construído no interior do tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da SHRHA da FEUP. Foram posicionadas divisórias de acrílico de maneira a formar um canal em frente a uma das pás do sistema de geração (a pá de uma das extremidades do tanque). Assim, estando limitado ao funcionamento de uma pá, o canal tinha sensivelmente 0.8m de largura fazendo com que a estrutura construída (0.75m de largura) ocupe praticamente toda essa largura. Os 0.05m sobranes foram preenchidos com material à medida para evitar que se gerassem efeitos indesejáveis lateralmente à estrutura.

Todos os ensaios foram realizados com uma profundidade de água no tanque de $h=0.425$ m (17 m), nível que representa o nível médio da água do mar (MSL) no protótipo.

A estrutura a ensaiar foi posicionada a 12.50m de distância da pá que coincide com o início do canal de ensaios, Figura 52. Uma vez posicionada, foi preciso assegurar que a estrutura não seria movimentada durante os ensaios devido à força das ondas. Para tal optou-se por colocar algum lastro com blocos de pedra na base da estrutura de aço assim como blocos cúbicos de betão na parte de trás da estrutura para ajudar a imobilizar a mesma.

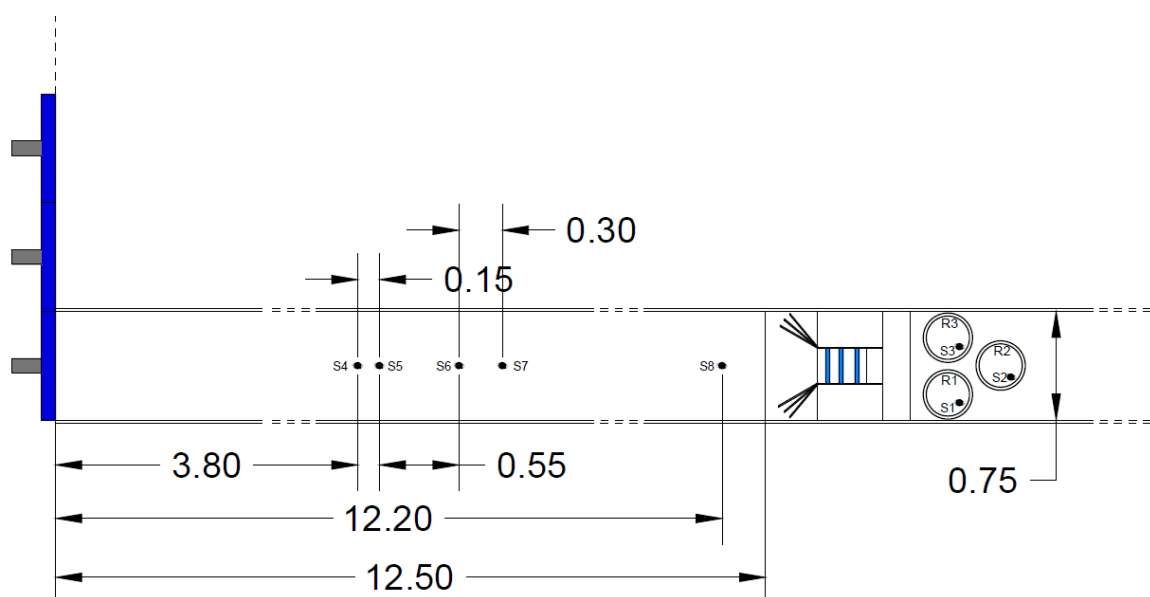


Figura 52 – Vista em planta do dispositivo experimental (medidas em metros).

Em todos os ensaios foram utilizados oito sensores de nível. Estes podem ser divididos em dois grupos principais: análise da agitação incidente e refletida e recolha do nível de água no interior dos depósitos auxiliar. Os sensores S4, S5, S6, S7 e S8 são responsáveis pela recolha de dados para análise da agitação incidente e para uma possível análise da agitação refletida. A posição em relação ao início do canal de cada uma das sondas está indicada na Figura 52. A sonda S8 foi posicionada mais perto da estrutura por forma a ter uma noção de qual a evolução da onda ao longo do canal e para perceber quais as características das ondas perto da estrutura. As sondas S1, S2 e S3 são sondas de menor dimensão e foram instaladas nos reservatórios auxiliares a fim de registar a evolução do nível de água nos mesmos. Estas sondas foram posicionadas de forma isolada dentro dos recipientes, isto é, foi realizada uma espécie de parede em torno das mesmas para evitar falsas interpretações do nível que podem ser induzidas pela flutuação da superfície livre. Através destes sensores são recolhidas as séries temporais do nível de água em cada ensaio para cada um dos reservatórios, extraindo-se das mesmas o tempo de funcionamento da bomba e consequentemente os caudais de galgamento. Na Figura 53 é possível observar a disposição experimental na proximidade da estrutura.



Figura 53 – Fotografia da disposição experimental na proximidade da estrutura.

3.5.3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A metodologia experimental utilizada no decorrer dos ensaios consistiu no seguinte:

- Em primeiro lugar, no início de cada conjunto de ensaios, foi efetuada a verificação de que o nível de água no tanque de ondas era o correto (0.425m). Para além disso verificou-se se as ligações entre os reservatórios do SSG e os reservatórios auxiliares se encontravam em boas condições de funcionamento;
- Finalizada a primeira operação, procedeu-se à calibração de todas as sondas utilizadas. Esta é das primeiras tarefas a realizar porque a calibração das sondas exige que a superfície livre da água onde se encontram esteja em repouso total;

- De seguida procedeu-se à sequência de iniciação do sistema de geração de ondas e da absorção dinâmica pertencente ao mesmo;
- Com tudo calibrado pode então dar-se início aos ensaios. São ajustados os parâmetros tanto no PC que controla a geração de ondas como no PC que controla a aquisição de dados e é iniciado o funcionamento de ambos;
- Por fim, no final de cada ensaio as bombas do sistema de medição de caudal devem ser ligadas manualmente para assegurar que os reservatórios auxiliares iniciam e finalizam os ensaios com a mesma altura de água no seu interior. Este facto permite afirmar que todo o caudal medido num determinado ensaio corresponde ao caudal de galgamento do mesmo ensaio;
- No fim de cada ensaio realizado espera-se o tempo suficiente para que a superfície livre volte a um estado de repouso total assegurando que a geração de ondas do seguinte ensaio não é afetada por oscilações que ainda possam existir no canal.

3.5.4. PRECISÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados experimentais do caso de estudo em causa apresentam uma determinada incerteza. Esta é provocada por eventuais efeitos de laboratório que ocorrem no decorrer dos ensaios como efeitos de escala, pequenos e inevitáveis efeitos tridimensionais provocados pela simplificação de componentes da instalação experimental, entre outros. Por outro lado, a forma da recolha de dados experimentais tem associada um erro que pode ser denominado de erro de medição. Este tipo de erro é evidente no funcionamento do sistema de medição de caudal. A bomba através da qual é determinado o caudal aproveitado pelo dispositivo ao longo dos ensaios admitiu-se, por simplificação, que funciona com um caudal constante. Esta simplificação tem como consequência a perda de precisão visto que o caudal de funcionamento da bomba varia com a altura de água presente nos reservatórios auxiliares. Contudo, durante os testes efetuados à bomba o nível de água foi mantido entre os limites definidos pelo sistema de controlo minimizando assim os erros associados ao funcionamento da bomba. Por fim é importante salientar que o método através do qual se determinou o tempo total de funcionamento das bombas para cada ensaio (a leitura manual dos intervalos de tempo nos quais a bomba estava em funcionamento), acrescenta também aos resultados obtidos uma incerteza, apesar de mínima.

3.6. PROGRAMA DE ENSAIOS

Neste ponto é realizada uma análise do recurso que se pretende aproveitar numa zona específica da costa portuguesa e uma posterior apresentação do programa de ensaios teórico com base na análise do mesmo. A zona escolhida corresponde à foz do Rio Douro onde já esteve projetada a construção de um dispositivo de coluna de água oscilante para explorar a energia das ondas. Esse projeto acabou por não ser executado mas, na altura em que foi estudado, foi elaborado um trabalho no qual foram determinadas as características do recurso na zona da foz do Douro [15].

As condições do mar em águas relativamente pouco profundas, como no caso considerado, podem variar radicalmente ao longo de centenas ou mesmo dezenas de metros. Contrariamente, as condições do mar *offshore* não variam significativamente ao longo de centenas de quilómetros. Como referido na secção 2.2.7. Energia das ondas, quando as ondas se aproximam da costa sofrem modificação devido a vários fenómenos característicos de águas pouco profundas. Assim, para estudar a modificação sofrida pelas ondas à medida que se deslocam de águas profundas (onde são medidas por uma bóia) para a zona em causa, foi necessário aplicar um modelo numérico que simula o fenómeno de refração [15].

A Tabela 13 apresenta as diferenças médias entre o recurso ao largo e na zona em estudo. O valor médio anual da altura de onda significativa (H_{m0}) *nearshore* é 1.46m que é substancialmente mais

pequena que o valor obtido nas medições realizadas pela bóia (2.07m). Em relação ao período energético (T_{-10}), os valores médios transformados revelam um ligeiro aumento quando comparados com os correspondentes valores medidos *offshore*. Como seria de esperar, a energia das ondas média anual na zona da foz do rio Douro é significativamente mais baixa do que as medições recolhidas na bóia ao largo. A diminuição é de sensivelmente 50% sendo que a energia ao largo é 28.5kW/m que por meio dos fenómenos sofridos na aproximação à costa é reduzida para 14.5kW/m. Por fim, a direção vetorial média das ondas (θ_v) passa de 308° (perto de NW 315°) *offshore* para 273° na proximidade da foz do rio Douro. Uma rotação de sensivelmente 35° no sentido Sul o que significa que a incidência de ondas é mais próxima da direção Oeste aproximando-se da direção perpendicular às linhas batimétricas, [15]. Por outro lado, a transformação provoca uma diminuição da dispersão direcional de incidência que pode ser considerada uma vantagem visto que o dispositivo a ensaiar é sensível à mudança da direção de incidência da onda. Na Tabela 14 é apresentada uma detalhada distribuição da frequência de ocorrência dos diferentes estados de mar.

Tabela 13 – Comparação entre os principais parâmetros médios *nearshore (plant)* e *offshore*, [15].

	Anual		Inverno		Verão	
	<i>Offshore</i>	<i>Nearshore</i>	<i>Offshore</i>	<i>Nearshore</i>	<i>Offshore</i>	<i>Nearshore</i>
H_{m0} (m)	2.07	1.46	2.38	1.73	1.75	1.18
T_{-10} (s)	9.1	9.6	10.1	10.9	8.0	8.3
P (kW)	28.5	14.5	39.6	20.4	17.5	8.5
θ_v (°N)	309.0	273.6	308.4	273.3	309.7	273.9

Tabela 14 – Distribuição anual baseada na frequência de ocorrência para cada classe de H_{m0} , T_{-10} para grupo direcionais de 10°, [15].

Dir. [°N]	\bar{T}_{-10} [s]	H_{m0} [m]										Sum
		0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25	
260°	6	1.69	0.97	0.33								2.99
	8	0.91	1.09	0.87	0.83	0.29	0.01					4.00
	10	0.18	0.19	0.16	0.29	0.24	0.17	0.01				1.24
	12		0.05	0.01	0.01							0.07
	14											
270°	16	0.01	0.01									0.02
	6	3.31	0.38	0.09								3.78
	8	4.84	3.03	1.04	0.54	0.17	0.02					9.64
	10	3.10	3.83	3.18	1.77	1.00	0.42	0.11	0.01			13.42
	12	2.09	2.89	3.57	2.28	1.09	0.77	0.33	0.15	0.08	0.03	13.28
280°	14	0.28	0.45	1.03	1.04	0.92	0.45	0.39	0.27	0.10	0.04	4.97
	16	0.04	0.08	0.19	0.30	0.27	0.17	0.11	0.27	0.18	0.11	1.72
	6	5.50	0.58									6.08
	8	10.01	5.84	1.78	0.12							17.75
	10	3.60	4.21	2.75	1.50	0.39	0.07	0.01				12.53
290°	12	0.60	1.35	1.31	1.02	0.53	0.22	0.11	0.11			5.25
	14	0.07	0.20	0.45	0.43	0.34	0.20	0.18	0.15	0.06	0.03	2.11
	16		0.01	0.05	0.07	0.03	0.03	0.11	0.03		0.06	0.39
	6	0.43	0.28									0.71
	8	0.02	0.03									0.05
290°	10											
	12											
	14											
	16											
	Sum	36.68	25.47	16.81	10.20	5.27	2.53	1.36	0.99	0.42	0.27	100.00

O modelo físico foi ensaiado para vários estados de mar. Os trabalhos iniciaram-se com uma série de ensaios introdutórios que serviram para avaliar o funcionamento do modelo. De seguida foram realizados ensaios com ondas regulares e por fim os ensaios com ondas irregulares utilizando o espectro JONSWAP. No caso das ondas regulares foram realizados ensaios de 5 min, duração que, na

escala real corresponde a períodos de 30 min. No caso dos ensaios com ondas irregulares a duração de cada um foi de 20 min que corresponde na escala do protótipo a aproximadamente 2 horas.

Os estados de mar simulados através do espectro JONSWAP são caracterizados pela altura de onda significativa ($H_s \equiv H_{m0}$) e pelo período de pico T_p que é relacionado com o período energético ($T_e \equiv T_{-10}$) através da seguinte expressão:

$$T_e = \frac{T_p}{1.15} \quad (16)$$

3.6.1. PROGRAMA DE ENSAIOS PRELIMINAR

Nos ensaios iniciais optou-se por realizar ensaios com ondas regulares e irregulares. Para começar selecionaram-se dois ensaios de ondas regulares com alturas de onda (H) e períodos (T) bem distintos com o objetivo de testar o funcionamento do modelo. Optou-se por uma altura de onda pequena e período reduzido e por outro lado uma altura de onda elevada e período longo. Seguiram-se quatro estados de mar irregulares com a altura de onda significativa a variar entre 1.25m e 4.25m sendo que na altura intermédia (2.75m) se ensaiaram dois períodos distintos.

Tabela 15 – Condições teóricas de agitação marítima para os ensaios preliminares.

ID	Hm (m)	Tm (s)	Hp (m)	Tp (s)
IR1	0.031	1.818	1.25	11.5
IR2	0.106	2.910	4.25	18.4
ID	Hsm (m)	Tpm (s)	Hsp (m)	Tpp (s)
II1	0.031	1.818	1.25	11.5
II2	0.069	1.818	2.75	11.5
II3	0.069	2.546	2.75	16.1
II4	0.106	2.910	4.25	18.4

As seis condições de agitação marítima foram ensaiadas para as sete diferentes combinações das configurações da estrutura apresentadas na Tabela 10. O resultado foi a matriz de ensaios apresentada de seguida (Tabela 16).

Tabela 16 – Programa teórico de ensaios preliminares, dimensões em protótipo.

Ensaio	Ângulo	Configuração	H Hs (m)	T Tp (s)	Duração (s)
0C1_IR1	0	C1	2.75	11.5	300
0C1_IR2	0	C1	4.25	18.4	300
0C1_II1	0	C1	1.25	11.5	1200
0C1_II2	0	C1	2.75	11.5	1200
0C1_II3	0	C1	2.75	16.1	1200
0C1_II4	0	C1	4.25	18.4	1200
30C2_IR1	30	C2	2.75	11.5	300
30C2_IR2	30	C2	4.25	18.4	300
30C2_II1	30	C2	1.25	11.5	1200
30C2_II2	30	C2	2.75	11.5	1200

Tabela 17 – Programa teórico de ensaios preliminares, dimensões em protótipo.
(continuação)

Ensaio	Ângulo	Configuração	H Hs (m)	T Tp (s)	Duração (s)
30C2_II3	30	C2	2.75	16.1	1200
30C2_II4	30	C2	4.25	18.4	1200
30C3_IR1	30	C3	2.75	11.5	300
30C3_IR2	30	C3	4.25	18.4	300
30C3_II1	30	C3	1.25	11.5	1200
30C3_II2	30	C3	2.75	11.5	1200
30C3_II3	30	C3	2.75	16.1	1200
30C3_II4	30	C3	4.25	18.4	1200
40C2_IR1	40	C2	2.75	11.5	300
40C2_IR2	40	C2	4.25	18.4	300
40C2_II1	40	C2	1.25	11.5	1200
40C2_II2	40	C2	2.75	11.5	1200
40C2_II3	40	C2	2.75	16.1	1200
40C2_II4	40	C2	4.25	18.4	1200
40C3_IR1	40	C3	2.75	11.5	300
40C3_IR2	40	C3	4.25	18.4	300
40C3_II1	40	C3	1.25	11.5	1200
40C3_II2	40	C3	2.75	11.5	1200
40C3_II3	40	C3	2.75	16.1	1200
40C3_II4	40	C3	4.25	18.4	1200
50C2_IR1	50	C2	2.75	11.5	300
50C2_IR2	50	C2	4.25	18.4	300
50C2_II1	50	C2	1.25	11.5	1200
50C2_II2	50	C2	2.75	11.5	1200
50C2_II3	50	C2	2.75	16.1	1200
50C2_II4	50	C2	4.25	18.4	1200
50C3_IR1	50	C3	2.75	11.5	300
50C3_IR2	50	C3	4.25	18.4	300
50C3_II1	50	C3	1.25	11.5	1200
50C3_II2	50	C3	2.75	11.5	1200
50C3_II3	50	C3	2.75	16.1	1200
50C3_II4	50	C3	4.25	18.4	1200

3.6.2. PROGRAMA DE ENSAIOS COM ONDAS REGULARES

Os ensaios realizados com ondas regulares são definidos, como já foi referido, pela altura de onda H e pelo período T . Foram ensaiadas três alturas de ondas e três períodos, que combinados dois a dois resultaram num total de nove condições de teste. Os ensaios com ondas regulares apesar de não serem relevantes quando se pretende avaliar a eficiência energética de um dispositivo visto que não se aproximam da natureza, são extremamente úteis para poder perceber qual a influência, por exemplo,

do período. Ao manter os parâmetros inalterados, variando unicamente o período, através destes ensaios, que são de curta duração, é possível avaliar com algum grau de fiabilidade as alterações provocadas pela alteração desse parâmetro. Na Tabela 18 são apresentadas as condições teóricas na escala do modelo (m) e na escala do protótipo (p).

Tabela 18 – Condições teóricas com ondas regulares programadas.

ID	Hm (m)	Tm (s)	Hp (m)	Tp (s)
R1	0.025	1.45	1	9.2
R2	0.025	1.82	1	11.5
R3	0.025	2.18	1	13.8
R4	0.050	1.45	2	9.2
R5	0.050	1.82	2	11.5
R6	0.050	2.18	2	13.8
R7	0.075	1.45	3	9.2
R8	0.075	1.82	3	11.5
R9	0.075	2.18	3	13.8

Tabela 19 – Programa teórico de ensaios para ondas regulares, dimensões do protótipo.

Ensaio	Ângulo	Configuração	H (m)	T (s)	Duração (s)
0C1_R1	0	C1	1	9.2	300
0C1_R2	0	C1	1	11.5	300
0C1_R3	0	C1	1	13.8	300
0C1_R4	0	C1	2	9.2	300
0C1_R5	0	C1	2	11.5	300
0C1_R6	0	C1	2	13.8	300
0C1_R7	0	C1	3	9.2	300
0C1_R8	0	C1	3	11.5	300
0C1_R9	0	C1	3	13.8	300
30C3_R1	30	C3	1	9.2	300
30C3_R2	30	C3	1	11.5	300
30C3_R3	30	C3	1	13.8	300
30C3_R4	30	C3	2	9.2	300
30C3_R5	30	C3	2	11.5	300
30C3_R6	30	C3	2	13.8	300
30C3_R7	30	C3	3	9.2	300
30C3_R8	30	C3	3	11.5	300
30C3_R9	30	C3	3	13.8	300
40C3_R1	40	C3	1	9.2	300
40C3_R2	40	C3	1	11.5	300
40C3_R3	40	C3	1	13.8	300
40C3_R4	40	C3	2	9.2	300
40C3_R5	40	C3	2	11.5	300
40C3_R6	40	C3	2	13.8	300

Tabela 20 – Programa teórico de ensaios para ondas regulares, dimensões do protótipo. (continuação)

Ensaio	Ângulo	Configuração	H (m)	T (s)	Duração (s)
40C3_R7	40	C3	3	9.2	300
40C3_R8	40	C3	3	11.5	300
40C3_R9	40	C3	3	13.8	300
50C3_R1	50	C3	1	9.2	300
50C3_R2	50	C3	1	11.5	300
50C3_R3	50	C3	1	13.8	300
50C3_R4	50	C3	2	9.2	300
50C3_R5	50	C3	2	11.5	300
50C3_R6	50	C3	2	13.8	300
50C3_R7	50	C3	3	9.2	300
50C3_R8	50	C3	3	11.5	300
50C3_R9	50	C3	3	13.8	300

As nove condições com ondas regulares foram ensaiadas para quatro diferentes combinações das configurações da estrutura, resultando em 36 ensaios. Segue-se a matriz teórica de ensaios para ondas regulares. Para cada combinação foi-se aumentando o período e mantendo constante a altura de onda até que estivessem completos os casos de cada altura de onda.

3.6.3. PROGRAMA DE ENSAIOS COM ONDAS IRREGULARES

As características dos ensaios com ondas irregulares foram definidas através do espectro JONSWAP. Foi utilizado um fator de pico $\gamma=3.3$ para todos os ensaios. Definido este parâmetro, as condições de cada estado de mar a ensaiar são definidas mediante a altura de onda significativa, H_s , e o período de pico T_p . Assim, foram programados nove estados de mar, resultantes da combinação de três alturas de onda significativas e três períodos de pico. Os estados de mar ensaiados correspondem aos mais representativos das condições de mar obtidas para a zona da foz do Douro (Tabela 14). Na Tabela 21 são apresentadas as características dos estados de mar ensaiados.

Tabela 21 – Condições teóricas de ondas irregulares ensaiadas.

ID	Hsm (m)	Tpm (s)	Hsp (m)	Tpp (s)
I1	0.019	1.45	0.75	9.2
I2	0.019	1.82	0.75	11.5
I3	0.019	2.55	0.75	16.1
I4	0.044	1.45	1.75	9.2
I5	0.044	1.82	1.75	11.5
I6	0.044	2.55	1.75	16.1
I7	0.069	1.45	2.75	9.2
I8	0.069	1.82	2.75	11.5
I9	0.069	2.55	2.75	16.1

De uma forma equivalente ao que aconteceu com os ensaios com ondas regulares, os de ondas irregulares contemplaram quatro diferentes configurações da estrutura resultando também um total de 36 ensaios.

Tabela 22 – Programa de ensaios teórico com ondas irregulares, dimensões do protótipo.

Ensaio	Ângulo	Configuração	Hs (m)	Tp (s)	Duração (s)
0C1_I1	0	C1	0.75	9.2	1200
0C1_I2	0	C1	0.75	11.5	1200
0C1_I3	0	C1	0.75	16.1	1200
0C1_I4	0	C1	1.75	9.2	1200
0C1_I5	0	C1	1.75	11.5	1200
0C1_I6	0	C1	1.75	16.1	1200
0C1_I7	0	C1	2.75	9.2	1200
0C1_I8	0	C1	2.75	11.5	1200
0C1_I9	0	C1	2.75	16.1	1200
30C3_I1	30	C3	0.75	9.2	1200
30C3_I2	30	C3	0.75	11.5	1200
30C3_I3	30	C3	0.75	16.1	1200
30C3_I4	30	C3	1.75	9.2	1200
30C3_I5	30	C3	1.75	11.5	1200
30C3_I6	30	C3	1.75	16.1	1200
30C3_I7	30	C3	2.75	9.2	1200
30C3_I8	30	C3	2.75	11.5	1200
30C3_I9	30	C3	2.75	16.1	1200
40C3_I1	40	C3	0.75	9.2	1200
40C3_I2	40	C3	0.75	11.5	1200
40C3_I3	40	C3	0.75	16.1	1200
40C3_I4	40	C3	1.75	9.2	1200
40C3_I5	40	C3	1.75	11.5	1200
40C3_I6	40	C3	1.75	16.1	1200
40C3_I7	40	C3	2.75	9.2	1200
40C3_I8	40	C3	2.75	11.5	1200
40C3_I9	40	C3	2.75	16.1	1200
50C3_I1	50	C3	0.75	9.2	1200
50C3_I2	50	C3	0.75	11.5	1200
50C3_I3	50	C3	0.75	16.1	1200
50C3_I4	50	C3	1.75	9.2	1200
50C3_I5	50	C3	1.75	11.5	1200
50C3_I6	50	C3	1.75	16.1	1200
50C3_I7	50	C3	2.75	9.2	1200
50C3_I8	50	C3	2.75	11.5	1200
50C3_I9	50	C3	2.75	16.1	1200

3.7. RESULTADOS

3.7.1. PARÂMETROS PARA AVALIAÇÃO DO DISPOSITIVO

Para a análise e comparação do dispositivo e das suas diferentes configurações é necessário tratar a informação das séries temporais registadas durante as experiências através dos sensores de nível. Em primeiro lugar analisam-se as séries temporais da sonda mais próxima do batente (S4) para perceber quais as características da agitação gerada pelo sistema de geração de ondas. Optou-se por usar a sonda S4 por esta ser a que apresenta menores efeitos de refração representado de uma forma mais fiável a agitação incidente. Com base nas séries temporais do nível de água nos reservatórios auxiliares Res1, Res2 e Res3 (Figura 54 e Figura 55 como exemplo) obtém-se o tempo de funcionamento da bomba. As séries temporais registam a evolução do nível de água no interior dos reservatórios auxiliares. O somatório de todos os tempos em que a série apresenta uma inclinação negativa, que corresponde aos momentos em que o nível de água nos reservatórios auxiliares está a diminuir ou seja, em que a bomba está a tirar água, corresponde ao tempo de funcionamento da bomba. Analisando os gráficos é possível observar o aumento do nível de água nos reservatórios causado pelos diferentes eventos de galgamento. Também é visível o funcionamento do sistema de controlo do nível de água nos reservatórios auxiliares que, quando a superfície livre alcança um determinado nível, o sistema de bombagem entra em funcionamento esvaziando um determinado volume de água.

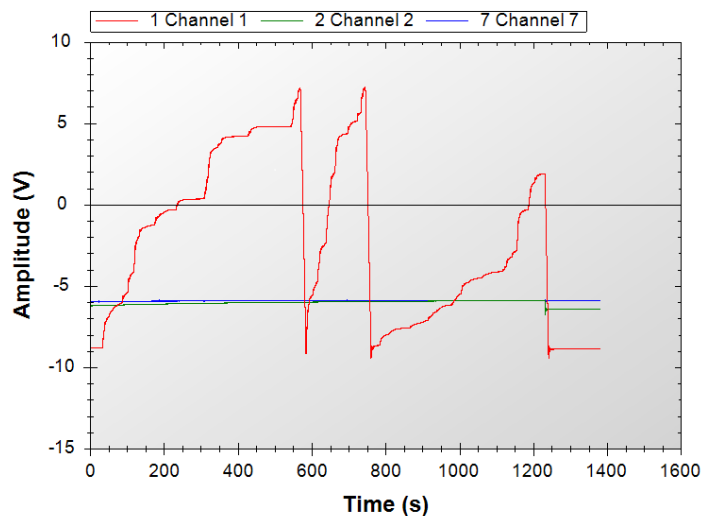


Figura 54 - Série temporal do nível de água nos três reservatórios (traduzido em V) para o ensaio 30C3_l1 ($H_s=0.75\text{m}$, $T_p=9.2\text{s}$ em dimensões do protótipo, Channel1≡Reservatório1, Channel2≡Reservatório2 e Channel7≡Reservatório3).

Sabendo o tempo de funcionamento total de cada bomba para um determinado ensaio, é possível calcular o volume de galgamento para esse mesmo ensaio em cada reservatório individualmente. Este volume pode ser calculado da seguinte forma:

$$V_{R,j} = t * q_b \quad (17)$$

em que $V_{R,j}$ representa o volume recolhido em cada um dos reservatórios (Res1, Res2 e Res3) durante um determinado ensaio, t o tempo de funcionamento das bombas hidráulicas submersas posicionadas

nos reservatórios auxiliares, dado retirado das séries temporais que registam o nível de água nos reservatórios auxiliares e q_b o caudal médio de funcionamento das bombas instaladas ($q_b=0.0005\text{m}^3/\text{s}$).

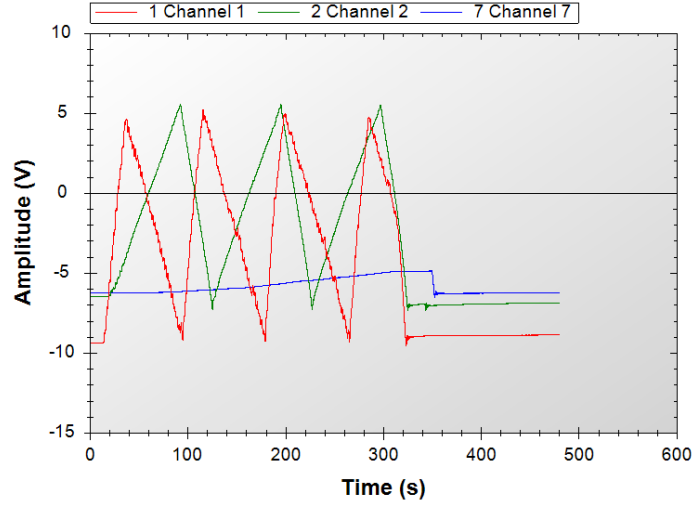


Figura 55 - Séries temporais dos níveis de água nos três reservatórios (traduzidos em V) para o ensaio 40C3_R6 ($H=2\text{m}$, $T=13.8\text{s}$ em dimensões do protótipo, Channel1≡Reservatório1, Channel2≡Reservatório2 e Channel7≡Reservatório3).

O caudal médio de galgamento nos diversos reservatórios pode ser obtido da seguinte forma:

$$q_{0v,j} = \frac{V_{R,j}}{t_T} \quad (18)$$

em que $q_{0v,j}$ representa o caudal médio de galgamento obtido para cada um dos reservatórios individualmente, $V_{R,j}$ o volume total recolhido em cada reservatório para um determinado ensaio, e t_T o tempo total do ensaio.

Com base nos parâmetros anteriores calcula-se a potência à entrada de cada um dos reservatórios (P_{crest}).

$$P_{R,j} = \rho g q_{0v,j} R_{c,n} \quad (19)$$

em que $P_{R,j}$ representa a potência à entrada de cada reservatório, ρ a massa volúmica da água ($\rho=1025\text{kg}/\text{m}^3$), g a aceleração da gravidade ($g = 9.81\text{m}/\text{s}^2$), $q_{0v,j}$ o caudal médio de galgamento obtido para o respetivo reservatório, e $R_{c,j}$ o nível da entrada dos reservatórios em relação ao nível médio da água do mar ($R_{c1}=1.5\text{m}$, $R_{c2}=3.0\text{m}$ e $R_{c3}=5.0\text{m}$).

Tendo a potência para cada um dos reservatórios é possível calcular a potência total para um determinado ensaio:

$$P_T = P_{R1} + P_{R2} + P_{R3} \quad (20)$$

Partindo da potência total consegue-se determinar a potência unitária (por largura de captura) do dispositivo:

$$P_w = \frac{P_T}{w} \quad (21)$$

em que P_w representa a potência unitária, P_T a potência total recolhida; e w a largura de captura do dispositivo que consiste na distância de uma extremidade da frente à outra, também designada de frente de captura.

Para ajudar à comparação entre as diferentes combinações determinam-se os ganhos de cada uma das situações com concentradores em relação à situação sem concentradores:

$$\text{Ganhos}(\%) = \frac{P_T}{P_{T0C1}} * 100 - 100 \quad (22)$$

sendo Ganhos, a relação em percentagem, P_T a potência total de uma situação com concentradores; e P_{T0C1} a potência total obtida na combinação sem concentradores.

Com o objetivo de obter uma comparação entre a eficiência das diferentes combinações calcula-se a eficiência hidráulica (η_{Hyd}) que pode ser calculada através da equação (6). O cálculo da eficiência exige o cálculo da potência da onda (P_{wave}) através da equação (3) e (4).

Por fim, estima-se a produção energética anual com base na Tabela 14, onde são apresentadas as probabilidades de ocorrência de cada estado de mar, e nos valores das eficiências estimados (2.5.4. Eficiência e produção de energia) que servem para obtenção da potência produzida.

$$P_p = \sum P_T * coef * \eta_{res} * \eta_{tur} * \eta_{gen} \quad (23)$$

em que P_p representa a potência produzida, $coef$ os coeficientes atribuídos com base na probabilidade de ocorrência de cada estado de mar, η_{res} a eficiência dos reservatórios; η_{tur} a eficiência das turbinas; e η_{gen} a eficiência do gerador elétrico.

A produção energética anual obtém-se da seguinte forma:

$$E = P_p * 365 * 24/100 \quad (24)$$

em que E representa a estimativa da energia produzida anualmente em MWh, 365 o número de dias do ano e 24 o número de horas de cada dia.

3.7.2. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

No presente subcapítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados com o modelo. Em primeiro lugar serão expostos os resultados dos ensaios preliminares, seguidos dos referentes aos ensaios com ondas regulares e por fim os resultados dos ensaios com ondas irregulares.

Os ensaios foram realizados com base no programa de ensaios teórico apresentado anteriormente. Contudo, surgiram algumas diferenças entre a agitação realmente gerada e a teórica proposta. Essas diferenças foram medidas através da recolha da variação da superfície livre com recurso à sonda de nível S4. Durante a apresentação dos resultados experimentais são consideradas as condições de agitação medidas.

3.7.2.1. Resultados dos ensaios preliminares

Para os 42 ensaios preliminares realizados foram calculados alguns dos parâmetros para avaliação do dispositivo apresentado anteriormente, (Anexo D). Tendo como base o tratamento de dados efetuado, compararam-se as diferentes configurações testadas (C1, C2 e C3). Para realizar esta primeira comparação (Figura 56) foram utilizados somente os resultados dos ensaios irregulares (II1, II2, II3 e II4).

Na Figura 56 é possível perceber que, como seria de esperar, qualquer uma das combinações que incluam concentradores apresenta uma potência total recolhida superior à configuração C1 que não apresenta qualquer tipo de concentradores. Este aumento da potência, nos casos em que se usam os concentradores, deve-se ao facto de a largura de captura do dispositivo ser artificialmente aumentada. Através da utilização dos concentradores, a largura de captura é aumentada e, por isso, aumenta a quantidade de energia presente na agitação que é espalhada na estrutura. Por outro lado, observou-se ao longo dos ensaios que ao ser gerada uma confluência de energia através da largura decrescente do canal formado pelos concentradores, estes provocam também um aumento da altura de onda que atinge a estrutura. Contudo, apesar de ser perceptível um aumento na potência total recolhida nas combinações que incluem concentradores, não é possível precisar qual a combinação mais vantajosa sendo preciso realizar mais ensaios para o efeito.

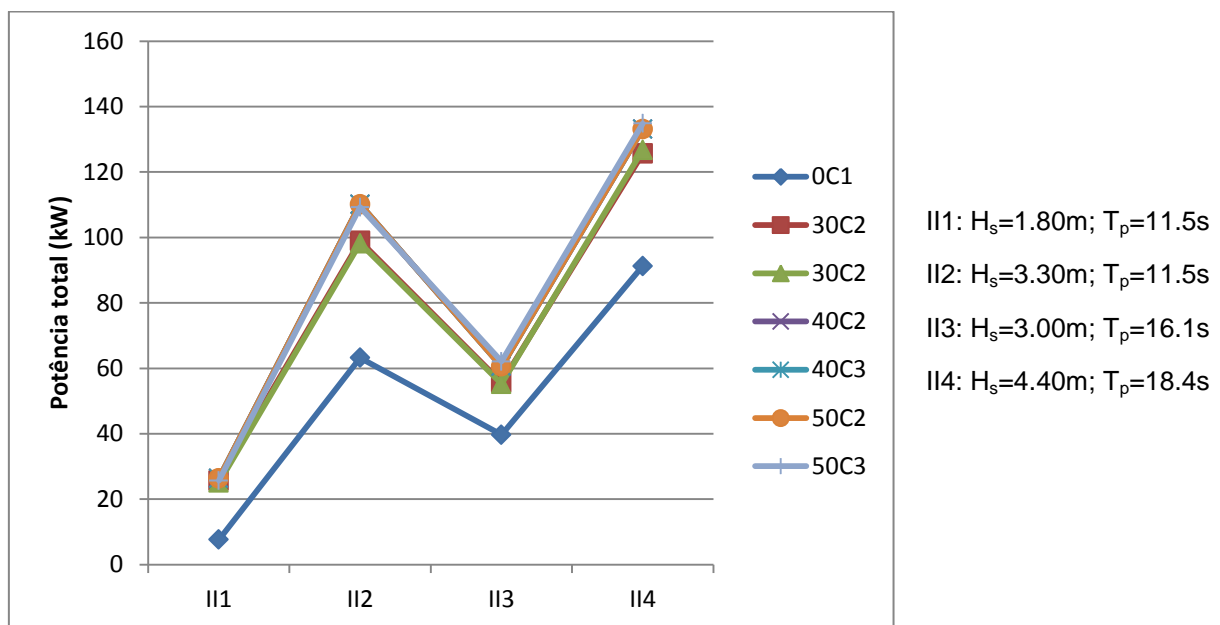
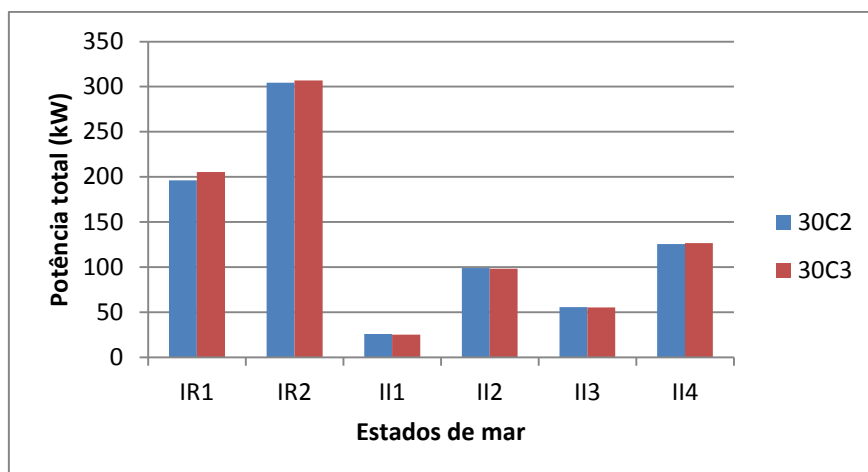


Figura 56 - Potência total em cada uma das combinações para os diferentes ensaios de ondas irregulares.

Os ensaios realizados permitiram ainda realizar uma análise comparativa entre as diferentes configurações C1, C2 e C3. Sendo que as configurações C2 e C3 proporcionam maiores valores de potência captada apresenta-se na Figura 57, Figura 58 e Figura 59 uma comparação entre as mesmas.



IR1: $H=2.50\text{m}$; $T=11.5\text{s}$

IR2: $H=5.00\text{m}$; $T=18.4\text{s}$

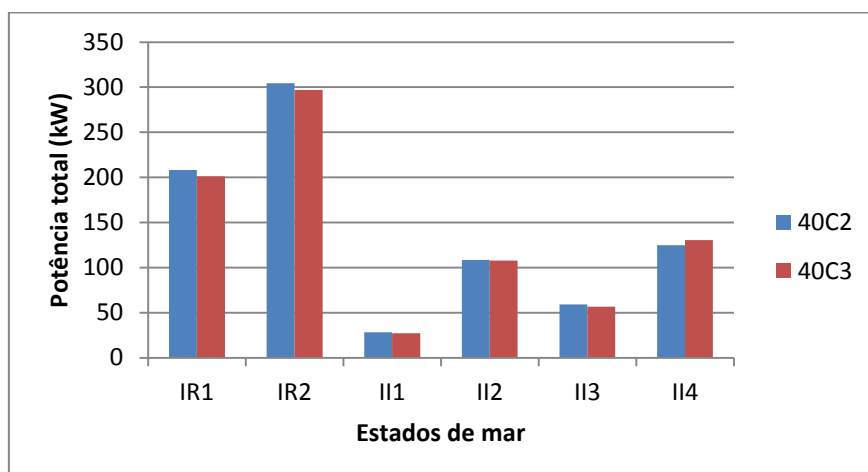
II1: $H_s=1.80\text{m}$; $T_p=11.5\text{s}$

II2: $H_s=3.30\text{m}$; $T_p=11.5\text{s}$

II3: $H_s=3.00\text{m}$; $T_p=16.1\text{s}$

II4: $H_s=4.40\text{m}$; $T_p=18.4\text{s}$

Figura 57 - Comparação entre a potência captada na configuração C2 e na configuração C3 para um ângulo de 30° dos concentradores.



IR1: $H=2.50\text{m}$; $T=11.5\text{s}$

IR2: $H=5.00\text{m}$; $T=18.4\text{s}$

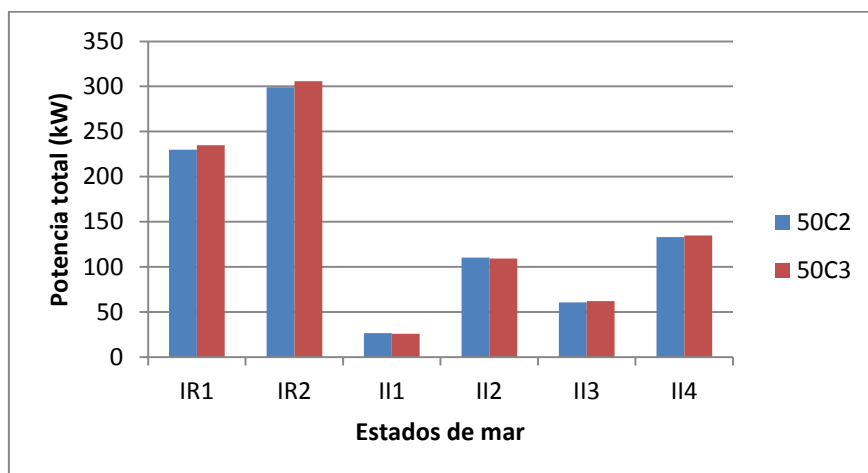
II1: $H_s=1.80\text{m}$; $T_p=11.5\text{s}$

II2: $H_s=3.30\text{m}$; $T_p=11.5\text{s}$

II3: $H_s=3.00\text{m}$; $T_p=16.1\text{s}$

II4: $H_s=4.40\text{m}$; $T_p=18.4\text{s}$

Figura 58 - Comparação entre a potência captada na configuração C2 e na configuração C3 para um ângulo de 40° dos concentradores.



IR1: $H=2.50\text{m}$; $T=11.5\text{s}$

IR2: $H=5.00\text{m}$; $T=18.4\text{s}$

II1: $H_s=1.80\text{m}$; $T_p=11.5\text{s}$

II2: $H_s=3.30\text{m}$; $T_p=11.5\text{s}$

II3: $H_s=3.00\text{m}$; $T_p=16.1\text{s}$

II4: $H_s=4.40\text{m}$; $T_p=18.4\text{s}$

Figura 59 - Comparação entre a potência captada na configuração C2 e na configuração C3 para um ângulo de 50° dos concentradores.

Analisando as três figuras percebe-se que a potência total captada na configuração C2 é muito semelhante ao valor correspondente aproveitado na configuração C3. Há ensaios em que a configuração C2 apresenta melhores resultados e tem outros em que a configuração C3 é melhor, sendo estes valores sempre muito próximos. Assim foi necessário calcular um índice que possibilitasse a comparação entre os dois casos:

$$I = \frac{P_{TC3}}{P_{TC2}} \quad (25)$$

em que I representa o índice, P_{TC3} os valores de potência total na configuração C3 e P_{TC2} os valores de potência total na configuração C2.

Tabela 23 – Tabela de índices de comparação entre C2 e C3.

	30°	40°	50°
IR1	1,05	0,97	1,02
IR2	1,01	0,97	1,02
II1	0,98	0,97	0,98
II2	0,99	0,99	0,99
II3	0,99	0,96	1,03
II4	1,01	1,04	1,01
Média	1,01	0,98	1,01

Na Tabela 23 é apresentado o índice descrito anteriormente para as diferentes orientações dos concentradores e diferentes estados de mar. No fim é calculada uma média do índice cada orientação dos concentradores. A média total para todas as orientações é de 1.00 o que significa que as duas configurações (C2 e C3) apresentam em média os mesmos resultados. Assim, e visto que a configuração C2 representa um maior gasto de construção não só pelo tamanho mas também pela maior dificuldade de manter a sua estabilidade por ser mais alta, pode-se concluir que a utilização da configuração C3 é mais vantajosa e por isso se deve incidir os próximos ensaios na mesma.

3.7.2.2. Resultados dos ensaios com ondas regulares

Os ensaios com ondas regulares foram realizados para tentar perceber em particular qual o comportamento da estrutura para diferentes alturas de onda e períodos. Isto é, através deste tipo de ensaio foi possível avaliar o desempenho do dispositivo para uma determinada altura de onda e diferentes períodos, variando de seguida essa altura de onda e repetindo os mesmos períodos. Assim, consegue-se avaliar o efeito de qualquer uma das variáveis, altura de onda ou período, mantendo a outra constante. Ou seja, para avaliar a influência da altura de onda, varia-se a mesma e mantém-se constante o período e para avaliar a influência do período, varia-se o mesmo e mantém-se inalterada a altura de onda.

A análise do efeito da altura de onda deve ser feita considerando o período relativamente inalterado ou seja, devem ser comparados os ensaios (R1, R4 e R7), (R2, R5 e R8) e (R3, R6 e R9) porque cada grupo de três apresenta o mesmo período. Assim percebe-se que o caudal de galgamento nos três reservatórios aumenta à medida que a altura de onda também aumenta, o que se verifica em qualquer combinação da estrutura. Em relação à diferença entre a combinação sem concentradores e a combinação com concentradores a 40° e configuração C3 (Figura 60 e Figura 61e Anexo E), por

exemplo, é perceptível um aumento geral do caudal de galgamento que é mais significativo nos dois reservatórios superiores visto que os concentradores provocam um aumento da altura de onda incidente permitindo que cada onda provoque maiores galgamentos nos níveis superiores. Esta tendência verifica-se também para as restantes combinações que incluem concentradores, com ligeiras alterações nos valores dos caudais.

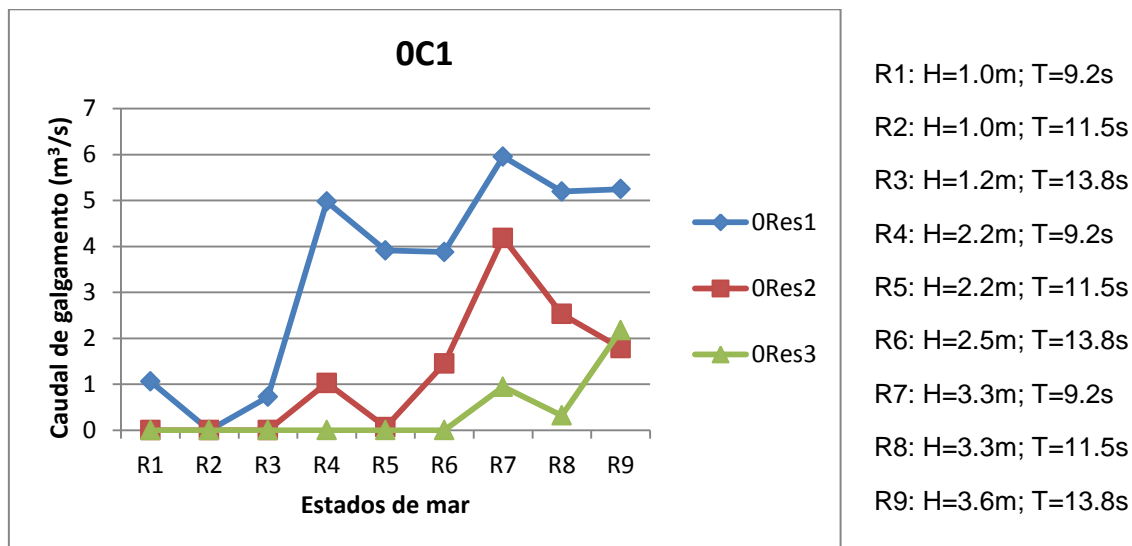


Figura 60 - Caudal de galgamento nos três reservatórios para os diferentes estados de mar na combinação 0C1.

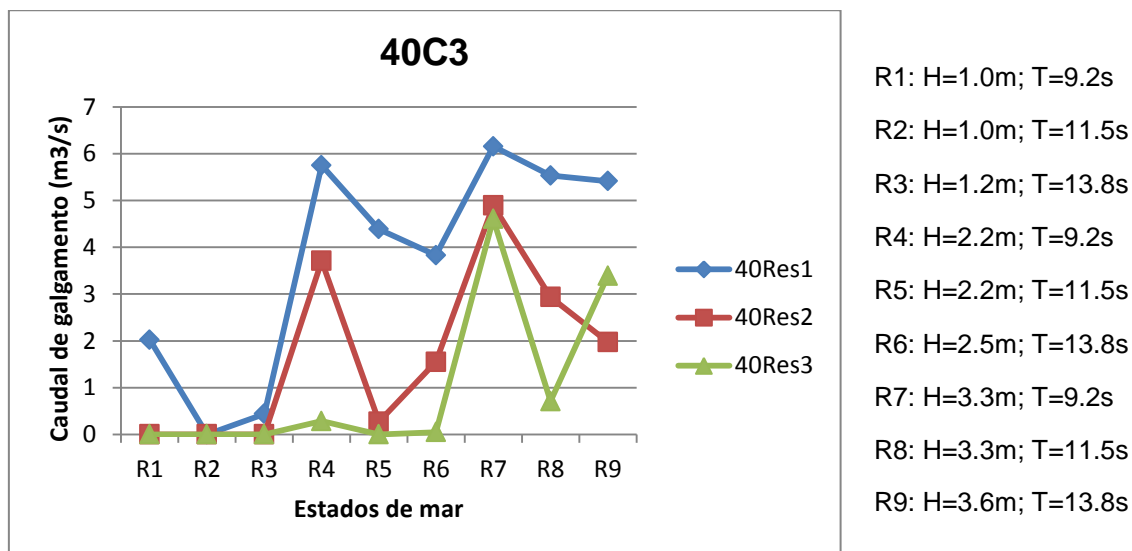


Figura 61 - Caudal de galgamento nos três reservatórios para os diferentes estados de mar na combinação 40C3.

Passando à análise da influência dos períodos, esta deve ser feita considerando uma altura de onda relativamente constante, isto é, devem ser comparados os ensaios (R1, R2 e R3), (R4, R5 e R6) e (R7, R8 e R9) porque cada grupo representa uma gama similar de alturas de onda. Existe uma tendência para a redução do caudal de galgamento à medida que é aumentado o período, o que seria de esperar porque o aumentar do período provoca a diminuição do número de ondas espraçadas na estrutura para um determinado intervalo de tempo (duração do ensaio, por exemplo).

Os valores de galgamento obtidos através dos testes realizados com ondas regulares não são representativos dos valores de galgamento para as ondas irregulares que ocorrem na natureza. Isto pode ser explicado pelo que se segue:

- Os galgamentos que ocorrem na natureza são fenómenos variáveis, e a reprodução de ondas individuais no interior de um arranjo de ondas irregulares é importante e não pode ser substituída pela análise de uma única onda sem que haja uma considerável perda de precisão;
- Quando se ensaiam ondas regulares surgem efeitos de ressonância na rampa de aproximação da estrutura. Estes efeitos podem ser tanto destrutivos como construtivos, mas nunca ocorrerão de uma forma tão evidente com ondas irregulares;
- A localização de nodos e anti-nodos devido a reflexões provenientes da estrutura é constante quando se trata de uma única altura de onda, como no caso dos ensaios com ondas regulares. Isto significa que o posicionamento exato da estrutura testada e das sondas de nível se revela importante, sendo que os resultados serão alterados se os posicionamentos referidos forem alterados, [43].

Durante os ensaios foi observado um caso que comprova que os ensaios regulares podem conduzir a resultados pouco fiáveis. Olhando para os resultados obtidos para o período de 11.5 s (R2, R5 e R6) estes apresentam algumas divergências quando comparados com os restantes períodos. Por exemplo, no Figura 60, comparando os ensaios R1, R2 e R3 conclui-se que o resultado do estado R2 deveria apresentar um mínimo de caudal de galgamento diferente de zero porque tem a mesma altura de onda que os restantes estados de mar (apesar de R3 ser ligeiramente superior). Esta diferença pode ser explicada pelos fenómenos apresentados anteriormente, não sendo possível precisar qual deles. Para tal seria preciso realizar mais ensaios e com diferentes condições de recolha de dados.

3.7.2.3. Resultados dos ensaios com ondas irregulares

Os ensaios com ondas irregulares, são os que mais se aproximam do que acontece na natureza. Precisamente por isso são aqueles que possibilitam a obtenção de resultados mais interessantes para realizar uma análise do ponto de vista energético. Assim, por meio da análise dos resultados dos ensaios com ondas irregulares foi possível comparar as diferentes combinações de configurações da estrutura do ponto de vista da obtenção de potência e da eficiência hidráulica, (Anexo F).

Na Figura 62 é apresentada a potência total na entrada dos reservatórios das diferentes combinações do dispositivo para todos os estados de mar experimentados. Analisando a figura é evidente que qualquer um dos concentradores aumenta a potência aproveitada pelo dispositivo. O aumento apurado é variável ao longo dos estados de mar e verifica-se uma relação com a alteração quer do período quer da altura de onda. Analisando os ensaios nos quais se mantém a altura de onda e se altera o período de pico, conclui-se que quanto menor o período de pico, maiores são as diferenças entre a situação sem concentradores e as situações com concentradores. Por outro lado, nos ensaios em que o período se mantém constante é perceptível que quanto maior for a altura de onda menores são os ganhos provocados pelos concentradores. Para um período de pico $T_p=9.2s$ (o menor) os ganhos na potência captada variam de 1150%, para a menor altura de onda, até 88%, para a maior altura de onda; com um período de pico $T_p=16.1s$ (o maior) os ganhos de potência variam entre 250%, para a menor altura de onda, e 39% para a maior altura de onda (Anexo F).

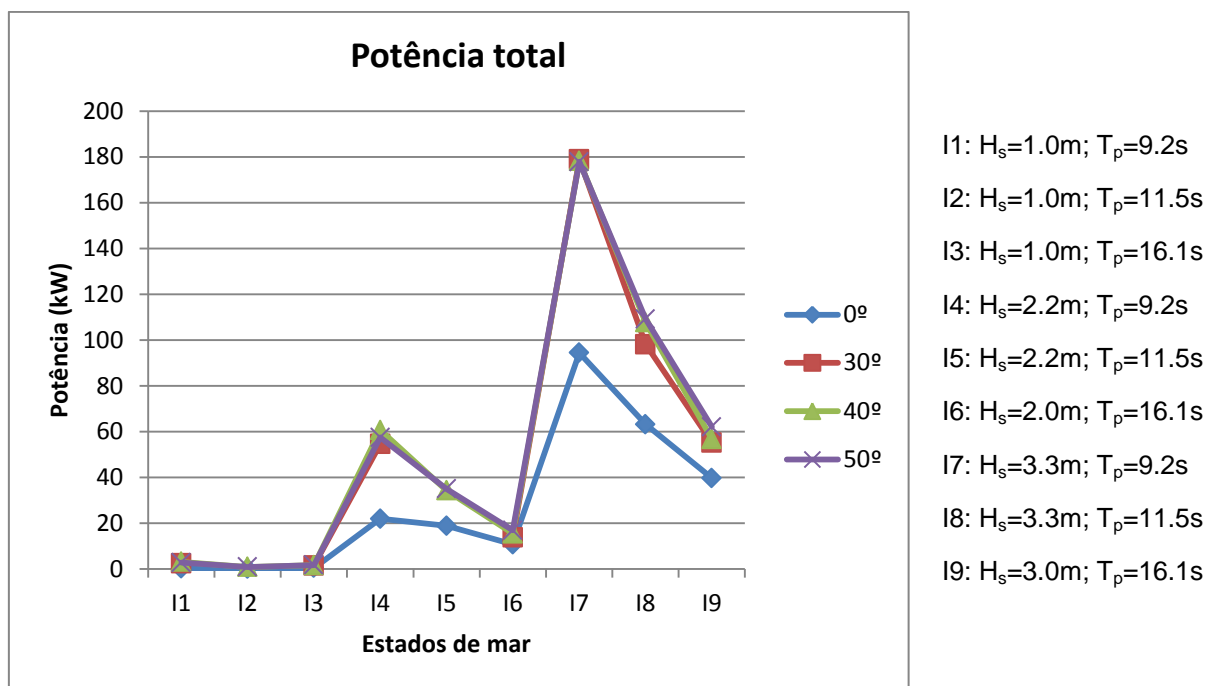


Figura 62 - Potência total das diferentes configurações para os estados de mar ensaiados.

Apesar de se concluir que há um ganho na potência aproveitada quando os concentradores são aplicados, não é possível avaliar qual dos ângulos de concentradores é o mais vantajoso. Para tal, apresenta-se a Figura 63 no qual se observa, por meio do somatório da potência aproveitada nos diferentes estados de mar para cada uma das combinações do dispositivo, que os concentradores a 40° e 50° são os que apresentam um melhor desempenho. Existe uma ligeira vantagem para o ângulo de 50° com um valor total de aproximadamente 430kW quando comparados com os 420kW conseguidos com um ângulo de 40°.

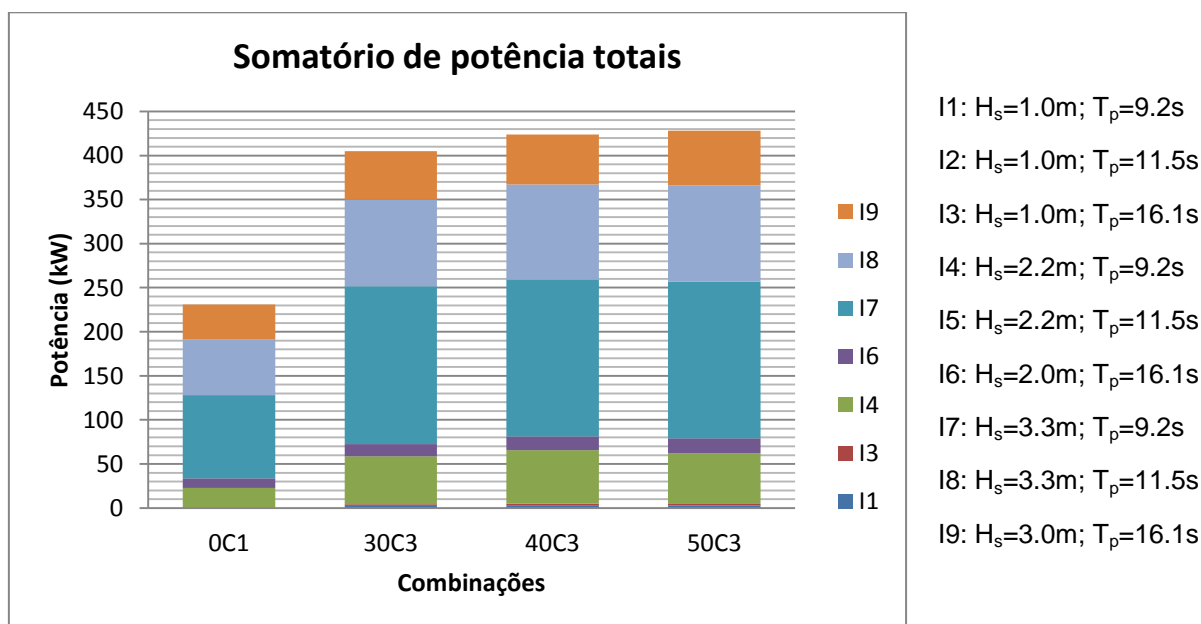


Figura 63 - Potência total do somatório dos estados de mar para as diferentes combinações.

Até agora, as diferentes combinações foram sempre comparadas com base nos valores da potência total aproveitada à entrada dos reservatórios. Contudo, deve ser realizada uma comparação tendo em conta a largura de captura do dispositivo que corresponde à dimensão na qual é aproveitada a energia da agitação marítima. Esta dimensão é diferente para cada um dos ângulos de orientação dos concentradores, Tabela 24. Quanto maior é o ângulo, maior é a largura ao longo da qual é recolhida a energia (largura de captura).

Tabela 24 – Largura de captura para as diferentes orientações.

Largura de captura	
0º	10,0 m
30º	21,6 m
40º	25,0 m
50º	28,0 m

Com base nas diferentes larguras de captura calcula-se a potência aproveitada por metro de frente (P_w) que quando relacionada com a potência da onda incidente (P_{wave}), resulta na eficiência hidráulica do dispositivo (η_{Hyd}).

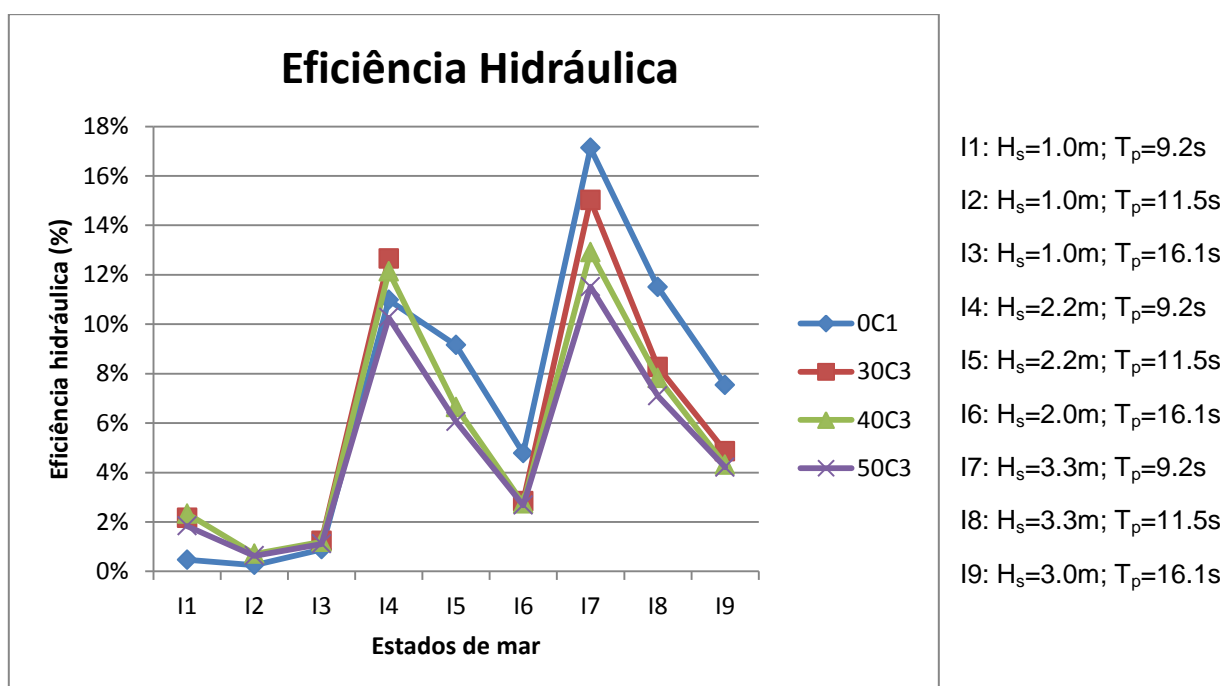


Figura 64 - Eficiência hidráulica das combinações para os estados de mar ensaiados.

Analisando a Figura 64 é perceptível que as soluções com concentradores (30C3, 40C3 e 50C3) apresentam um melhor desempenho para os estados de mar com menores alturas de onda significativas enquanto a solução sem concentradores tem melhores eficiências para os estados de mar com maiores alturas de onda. Tendo presente que os estados de mar com menores alturas de onda são os que têm uma maior probabilidade de ocorrência, os resultados das situações com concentradores são surpreendentes. Isto porque, mesmo apresentando uma maior largura de captura o que diminui a potência unitária (P_w) e mantendo a largura do dispositivo de aproveitamento em si inalterada, as situações com presença de concentradores revelam um aumento da eficiência para os estados de mar

que mais ocorrem e para os quais existe uma maior dificuldade de aproveitamento de energia. Observando os dois casos que apresentaram uma maior potência total aproveitada (40C3 e 50C3), é visível que a combinação 40C3 apresenta melhores resultados aproximando-se muito dos obtidos para a combinação 30C3 que tem uma largura de captura menor. Isto quer dizer que os concentradores na situação 40C3 quando comparados com 50C3 apresentam o melhor desempenho tendo em conta a largura de captura que apresentam.

Por fim, foi elaborada uma estimativa da produção energética anual na costa portuguesa para cada uma das combinações ensaiadas. Com base nas probabilidades de ocorrência dos estados de mar apresentada na Tabela 14 atribuiu-se uma percentagem de ocorrência a cada altura de onda significativa ensaiada. Como não foram ensaiadas todas as alturas de onda significativa que são apresentadas na Tabela 14 houve a necessidade de distribuir ponderadamente as probabilidades dessas pelas mais próximas alturas de onda ensaiadas. As potências médias de cada altura de onda significativa foram então multiplicadas pela respetiva percentagem de ocorrência resultando uma potência média anual capturada à entrada dos reservatórios.

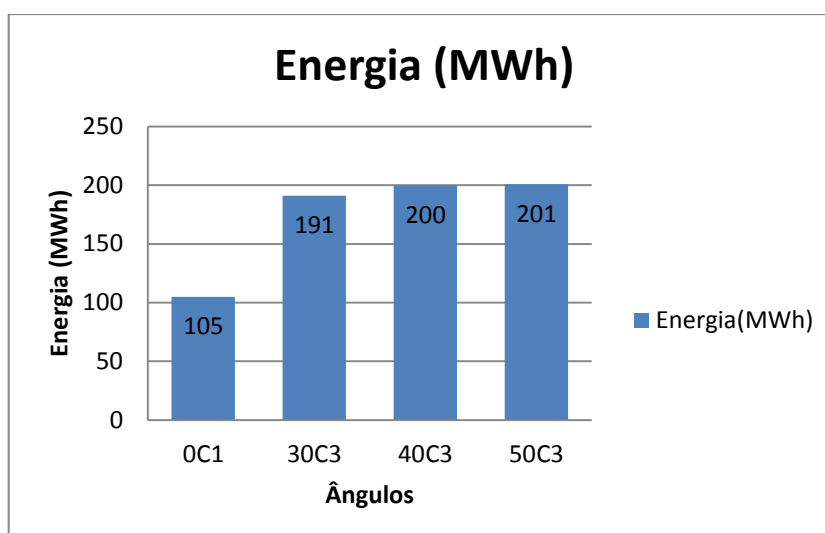


Figura 65 - Estimativa da energia anualmente produzida.

As estimativas da energia produzida apresentadas no Figura 65 indicam que as combinações 40C3 e 50C3 são as mais favoráveis energeticamente e muito semelhantes (200MWh e 201MWh). Quando comparadas com a situação 0C1 (105MWh) conclui-se que a utilização destas configurações de concentradores aumenta a produção de energia para o dobro aproximadamente.

Compilando todas as análises energéticas efetuadas, é evidente que a utilização dos concentradores é benéfica em relação à produção de energia. O aumento da potência aproveitada é mais evidente para os estados de mar com baixas alturas de onda significativa e períodos reduzidos, ou seja, os estados de mar que têm as maiores probabilidades de ocorrência ao longo do ano. A orientação dos concentradores influencia a energia aproveitada e quanto maior a inclinação, maior a energia produzida. Contudo, como demonstra a Figura 65, o ganho de energia produzida de 40° para 50° não é significativa o que pode indicar que, para maiores ângulos, a relação pode não se manter, e a energia produzida não aumentar com o aumento dos ângulos. Por outro lado, e visto que a diferença entre a estimativa da energia produzida para 40° e 50° é mínima, pode-se afirmar que a combinação 40C3 é que apresenta o melhor desempenho energético. O facto de apresentar praticamente a mesma energia produzida estimada e utilizar uma menor largura de captura, relativamente à combinação 50C3, faz

com que a combinação 40C3 seja a mais favorável. Do ponto de vista estrutural é de prever que quanto maior for o ângulo dos concentradores maiores serão as pressões aplicadas aos mesmos. Quanto maior o ângulo mais próximo da perpendicular à direção de incidência estarão as paredes verticais, o que se traduz numa maior exposição às forças aplicadas pela agitação. Ou seja, quanto maior for o ângulo maior será a dificuldade de garantir a sobrevivência e estabilidade das paredes o que se traduz em maiores custos de construção. Posto isto, é possível afirmar que a combinação 50C3 é também menos interessante a nível estrutural do que a combinação 40C3.

Ao longo de toda a análise o dispositivo é avaliado como sendo uma estrutura única isolada. Seria importante fazer uma análise energética da implementação de vários dispositivos posicionados lado a lado (construção modular). Ao aplicar os concentradores a largura de captura do dispositivo aumenta tal como o espaço ocupado pelo mesmo. Assim, apesar de aumentarem a energia produzida, os concentradores diminuem o número de módulos do dispositivo possíveis de instalar num determinado comprimento. Por outro lado, o dispositivo desenvolvido com concentradores, apesar de ter uma maior largura, pode representar um menor custo de construção quando comparado com a solução sem concentradores. Isto é, considerando um determinado comprimento de instalação, a situação com concentradores quando comparada com a sem concentradores, pode apresentar uma melhor relação entre a energia produzida e o investimento necessário. Para conseguir comparar as diferentes situações é necessário conhecer os custos discriminados da cada uma das componentes do dispositivo, salientando a componente dos concentradores que implica um estudo aprofundado.

4

CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

4.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente dissertação apresenta o desenvolvimento de um dispositivo para o aproveitamento da energia das ondas a incorporar numa estrutura costeira sendo esta objeto de estudos com recurso à modelação física. A escolha do tipo de dispositivo a desenvolver é apoiada por uma caracterização das tecnologias existentes e posterior análise técnico-económica dos dispositivos existentes, em construção ou com estudos de projecção realizados. Por meio das análises efetuadas conclui-se os dispositivos de aproveitamento de energia integrados noutras estruturas costeiras apresentam melhores indicadores visto que a construção da estrutura é, em regra, o investimento principal de todo o processo. Da mesma análise é perceptível que o aproveitamento da energia das ondas por meio do fenómeno de galgamento, através do dispositivo SSG (Sea-wave Slot-cone Generator) é promissor. A sua incorporação nas estruturas costeiras reduz a quantidade de energia que solicita as mesmas, transformando a energia aproveitada em forças de estabilização da estrutura global.

O modelo desenvolvido é baseado no dispositivo SSG, apresentando algumas alterações com vista à otimização do caudal de galgamento recolhido pela estrutura. As alterações consistem na introdução de concentradores ou seja paredes verticais que aumentam a frente de captura do dispositivo, aumentando assim a energia aproveitada.

O modelo do dispositivo desenvolvido, reproduzido à escala 1:40, foi estudado por meio de ensaios em tanque de ondas. Foram realizadas experiências com ondas regulares e ondas irregulares (espectro JONSWAP), sendo as últimas as mais relevantes porque se aproximam mais da realidade. Os estados de mar ensaiados foram selecionados tendo em conta as características do recurso na zona da foz do Douro, Porto. Os dados recolhidos no decorrer do trabalho experimental permitem avaliar o modelo do ponto de vista energético, através da quantificação dos caudais de galgamento que ocorrem em cada reservatório.

Os ensaios permitiram concluir que todas as combinações que incluem concentradores aumentam o caudal de galgamento, e consequentemente também a potência aproveitada à entrada dos reservatórios. Os concentradores fazem com que seja recolhida uma maior largura de ondas incidentes, através do aumento da largura de captura do dispositivo. Por outro lado, observa-se que o facto de os concentradores formarem uma espécie de canal cada vez mais estreito provoca um aumento da altura da onda que é espraçada no dispositivo SSG. Com base nos resultados dos mesmos ensaios é possível comparar as duas configurações de concentradores C2 e C3 e concluir que ambas apresentam, em

média, os mesmos resultados. Assim, o estudo da configuração C2 não avançou mais porque a configuração C3 representa uma construção menos dispendiosa quer pela menor dimensão quer pela maior facilidade de assegurar a sua estabilidade.

As experiências com ondas regulares, apesar das suas limitações, permitem avaliar a influência da altura de onda e do período no funcionamento do modelo. Assim, o caudal de galgamento aumenta para os três reservatórios quando a altura de onda incidente aumenta. Contrariamente, quando o período aumenta o caudal de galgamento diminui. É visível ainda que nas combinações que incluem concentradores existe um aumento do caudal de galgamento, como já foi referido, e que esse aumento é mais expressivo nos dois reservatórios superiores. Isto pode ser explicado pelo aumento do espraçamento provocado pelos concentradores.

Os ensaios com ondas irregulares possibilitam realizar uma análise do desempenho energético do dispositivo desenvolvido comparando as diferentes configurações. Os diversos estados de mar ensaiados permitem concluir que as combinações 40C3 e 50C3 são as mais vantajosas em relação à potência total aproveitada, verificando-se uma ligeira diferença a favor da combinação 50C3. A eficiência hidráulica da configuração 40C3 é superior à da 0C1 para a altura de onda significativa mais baixa ensaiada ($H_s=0.75\text{m}$) que é também a altura de onda com maior probabilidade de ocorrência para a zona considerada. Visto que a eficiência hidráulica é inversamente proporcional à largura de captura os resultados para alturas de onda significativas baixas e períodos de pico curtos são surpreendentes porque a largura de captura nos casos de concentradores é no mínimo 2,1 vezes maior que no caso sem concentradores. Por fim foi realizada uma estimativa da produção energética anual para cada uma das combinações ensaiadas. Mais uma vez, através da estimativa de energia produzida se conclui que as combinações 40C3 e 50C3 são as mais favoráveis e muito semelhantes entre si (200MWh e 201MWh respetivamente). Quando comparadas com a situação 0C1 (105Mwh) pode-se afirmar que, tendo em conta o recurso presente na foz do Douro, os concentradores podem duplicar a produção energética anual do modelo desenvolvido.

Ainda que as combinações 40C3 e 50C3 apresentem comportamentos muito próximos, conclui-se que o ângulo de 40° é mais favorável quer do ponto de vista energético quer do ponto de vista estrutural. Do ponto de vista energético consegue-se aproveitar sensivelmente a mesma quantidade de energia ou potência para os dois casos, mas no caso de 40° a eficiência hidráulica é superior visto que a largura de captura é mais baixa que no caso de 50° . A nível estrutural é de esperar que quanto maior for o ângulo da orientação dos concentradores maiores serão as pressões aplicadas aos mesmos devido à maior exposição à agitação marítima. No entanto, uma análise mais aprofundada de ângulos situados no intervalo 40° - 50° seria interessante para esclarecer bem esta questão.

4.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Com base nas experiências realizadas e nos resultados obtidos e apresentados anteriormente apresentam-se de seguida recomendações para desenvolvimentos futuros do tema abordado na dissertação.

- Ao longo dos ensaios, foi sempre considerado o nível médio da água do mar e a direção de incidência da agitação foi sempre perpendicular à estrutura. Seria importante avaliar o comportamento dos concentradores para diferentes níveis de maré e para as direções de incidência que ocorram na zona de estudo;
- Devem ser estudados mais ângulos de orientação dos concentradores, principalmente valores situados no intervalo $40^\circ \sim 50^\circ$;
- De maneira a facilitar o desenvolvimento da tecnologia, o desenvolvimento de um programa de modelação numérica que simule o funcionamento do dispositivo com os respetivos concentradores é essencial;
- A avaliação da questão estrutural, principalmente dos concentradores, não foi abordada e deve ser analisada recorrendo à modelação física ou à modelação numérica;
- O estudo dos custos das diferentes componentes deve ser realizado porque a viabilidade económica é sempre um dos fatores a ter em causa no desenvolvimento de um dispositivo de aproveitamento de energia;
- O estudo técnico-económico de uma solução de vários dispositivos construídos lado a lado (construção modular).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Enerdata Global Energy Statistical Yearbook 2014 (<http://yearbook.enerdata.net/electricity-domestic-consumption-data-by-region.html>.) 11 de Março de 2014.
- [2] EDP Energias de Portugal (<http://www.edp.pt/en/aedp/unidadesdenegocio/distribuicaodeelectricidade/Pages/Distribui%C3%A7%C3%A3oPT.aspx>.) 11 de Março de 2014
- [3] REN21. *Renewables Global Futures Report 2013*. 2013.
- [4] Joint Research Centre - Institute for Energy and Transport (IET) (<http://iet.jrc.ec.europa.eu/eu-track-2020-renewable-energy-targets>.) 11 de Março de 2014.
- [5] RenewableEnergyWorld (<http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2011/01/obama-calls-for-80-clean-energy-by-2035>.) 11 de Março de 2014.
- [6] Portuguesa, República *Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis ao Abrigo da Diretiva 2009/28/CE*. Diário da República, 2013
- [7] WAVEC - offshore renewables (http://www.wavec.org/energias_marinhas#.UwOg3oV-A1p.) 14 de Fevereiro de 2014.
- [8] Research & Innovation - Energy (http://ec.europa.eu/research/energy/eu/index_en.cfm?pg=research-ocean.) 14 de Fevereiro de 2014
- [9] INEGI, WavEC, ENERGYIN. *OTEO - Observatório Tecnológico para as Energias Offshore. Estado da Arte - Relatório*. 2012.
- [10] Association, The European Wind Energy. *Wind in our Sails - The coming of Europe's offshore wind energy industry*. 2011.
- [11] A. Barata da Rocha, Rui Teixeira, Tiago Morais, António Sarmento. *Observatório tecnologico para as "energias offshore" - Uma descrição do projeto OTEO*. 2014.
- [12] Falcão, António F. de O. *Wave energy utilization: A review of the technologies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, ELSEVIER.
- [13] Margheritini, L., Vicinanza, D. e Frigaard, P. *SSG wave energy converter: Design, reliability and hydraulic performance of an innovative overtopping device*. Renewable Energy, 2007, ELSEVIER.
- [14] Arena, Felice, et al. *INSTALLING U-OWC DEVICES ALONG ITALIAN COASTS*. Proceedings of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering Junho de 2013.
- [15] Henriques, J.C.C., Cândido J. J. *Wave energy resource assessment for a breakwater-integrated oscillating water column plant at Porto, Portugal*. Energy, 2013, ELSEVIER.
- [16] OpenEI - Marine and Hydrokinetic Technology Glossary (http://en.openei.org/wiki/Marine_and_Hydrokinetic_Technology_Glossary.) 21 de Fevereiro de 2014.
- [17] WAVEenergy (<http://www.waveenergy.no/res/animasjoner/workingprinciple4raskere.gif>.) 21 de Fevereiro de 2014.
- [18] PLANETA COPPE (<http://www.planeta.coppe.ufrj.br/artigo.php?artigo=833>.) 27 de Fevereiro de 2014.

- [19] Revista metro quadrado (<http://www.revistam2.com.br/energia-onda-mar/>). 27 de Fevereiro de 2014.
- [20] MOWC, NEREIDA. *OWC INTEGRATION IN THE NEW MUTRIKU BREAKWATER, PUBLISHABLE FINAL ACTIVITY REPORT*. 2012.
- [21] Energías Renovables (<http://www.energias-renovables.com/articulo/mutriku-ofrecera-visitas-guiadas-a-la-planta-20131209/>). 21 de Fevereiro de 2014.
- [22] Ulowa Wiki (<https://wiki.uiowa.edu/display/greenergy/Oscillating+Water+Column>). 21 de Fevereiro de 2014.
- [23] Belfast, The Queen's University of. *ISLAY LIMPET WAVE POWER PLANT, PUBLISHABLE REPORT*. 2002.
- [24] Trust, The Carbon. *Oscillating Water Column Wave Energy Converter Evaluation Report*. Marine Energy Challenge. 2005.
- [25] Support Wave Energy - Help the Pico Power Plant (<http://www.save-pico-powerplant.org/>). 27 de Fevereiro de 2014.
- [26] Wave Energy Centre - OWC PICO POWER PLANT (<http://www.pico-owc.net/>). 27 de Fevereiro de 2014.
- [27] Waveplam (<http://www.waveplam.eu/page/default.asp?id=466>). 27 de Fevereiro de 2014.
- [28] wavenergy.it. (http://www.wavenergy.it/documents/leaflet_weavenergy%20GB.pdf). 21 de Fevereiro de 2014.
- [29] Arena, Felice, et al. *On design and building of a U-OWC wave energy converter in the Mediterranean sea: a case of study*. Proceedings of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Junho de 2013.
- [30] Thorpe, T W. *A Brief Review of Wave Energy*. A report produced for the UK Department of Trade and Industry. 1999.
- [31] Wave Power Generation. (<http://people.bath.ac.uk/mh391/WavePower/tapchan.html>). 27 de Fevereiro de 2014.
- [32] Monika Bakke, Wave Energy AS. *WAVESSG, Full-scale demonstration of robust and high-efficiency wave energy converter*. 2008.
- [33] The Norwegian Trade Portal. (<http://www.nortrade.com/sectors/articles/power-generation-norways-renewable-energy-future/>). 27 de Fevereiro de 2014.
- [34] Margheritini, Lucia. Troch, Peter. Stratigaki, Vasiliki. *Geometry Optimization of an Overtopping Wave Energy Device Implemented into the New Breakwater of the Hanstholm Port Expansion*. Proceedings of the Twenty-second (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference. 2012.
- [35] Kramer, Morten M.. Marquis, Laurent. Frigaard, Peter. *Performance Evaluation of the Wavestar Prototype*. 2012.
- [36] WAVESTAR. *Wavestar Demonstrator, monthly report for May 2013*. Report for Energinet.dk, ForskVe 12110 "Increasing reliability and reducing maintenance on Wavestar wave energy plants in order to reduce the Cost of Energy". 2013.
- [37] Margheritini, Lucia. Frigaard, Peter. *Technological and Commercial Comparasion of OWC and SSG Wave Energy Converters Built into Breakwaters*. 2009.
- [38] Vicinanza, Diego, Margheritini, Lucia e Buccino, Jens Peter Kofoed e Mariano. *The SSG Wave Energy Converter: Performance, Status and Recent Developments*. 2012.
- [39] Hughes, Steven A. *Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering*. 1993.
- [40] Briggs, Michael J. *Basics of Physical Modeling in Coastal*. 2013.
- [41] Heller, Valentin. *Development of wave devices from initial conception to commercial demonstration*. Southampton. 2011.

[42] Taveira-Pinto, Francisco. Veloso-Gomes, Fernando. Silva, Raquel. Das Neves, Luciana. Rosa Santos, Paulo. Guedes Lopes, Hugo. Cristina Neves, Ana. *O novo sistema de geração e aquisição de agitação marítima do Laboratório de Hidráulica da FEUP*. 2as Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente. 2007.

[43] Kofoed, Jens Peter. *Model testing of the wave energy converter Seawave Slot-Cone Generator*. Aalborg. 2005.

ANEXOS

ANEXOS

Anexo A – Peças desenhadas e projeto em SolidWorks do modelo.....	89
Anexo B – Instalação experimental.....	97
Anexo C – Dados recolhidos experimentalmente.....	99
Anexo D – Tratamento de dados de ensaios preliminares.....	101
Anexo E – Tratamento de dados de ensaios com ondas regulares.....	103
Anexo F – Tratamento de dados de ensaios com ondas irregulares.....	107

ANEXO A: PEÇAS DESENHADAS E PROJETO EM **SOLIDWORKS** DO MODELO

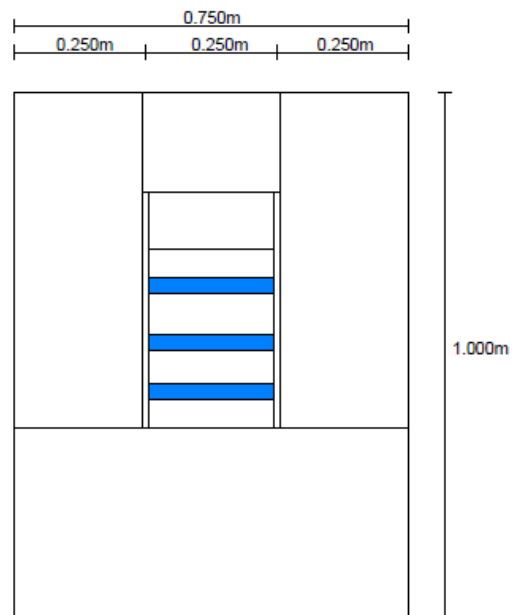


Figura A1 – Desenho em planta do modelo sem concentradores.

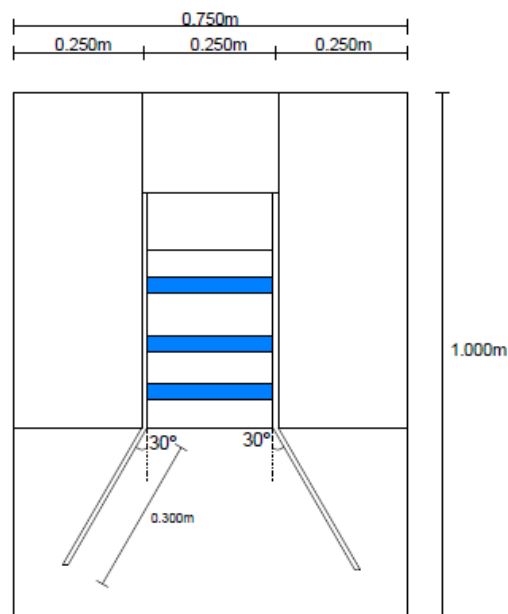


Figura A2 – Desenho em planta do modelo com concentradores a 30°.

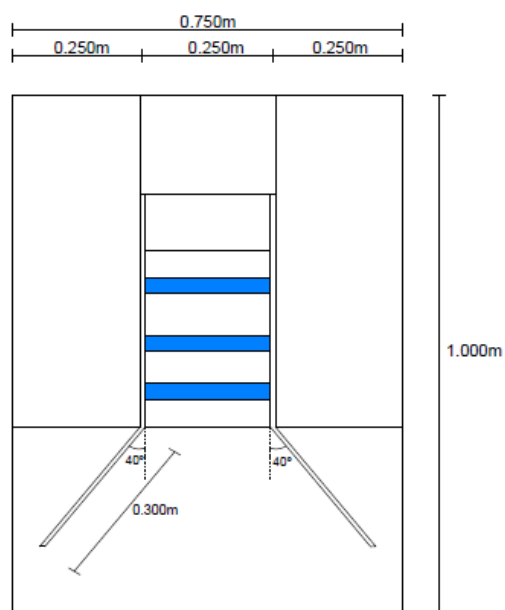


Figura A3 – Desenho em planta do modelo com concentradores a 40°.

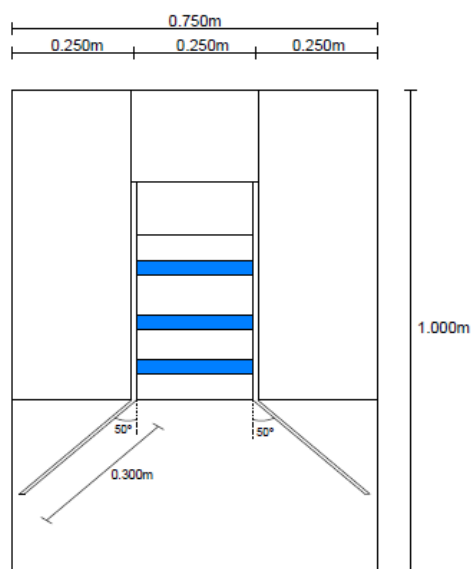


Figura A4 – Desenho em planta do modelo com concentradores a 50°.

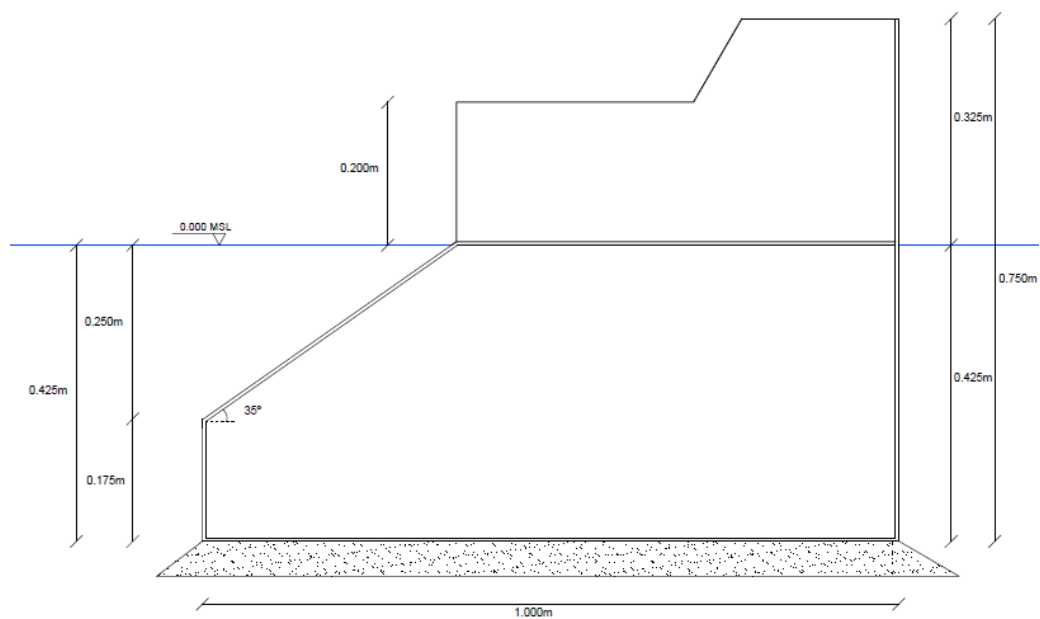


Figura A5 – Vista lateral do modelo sem concentradores.

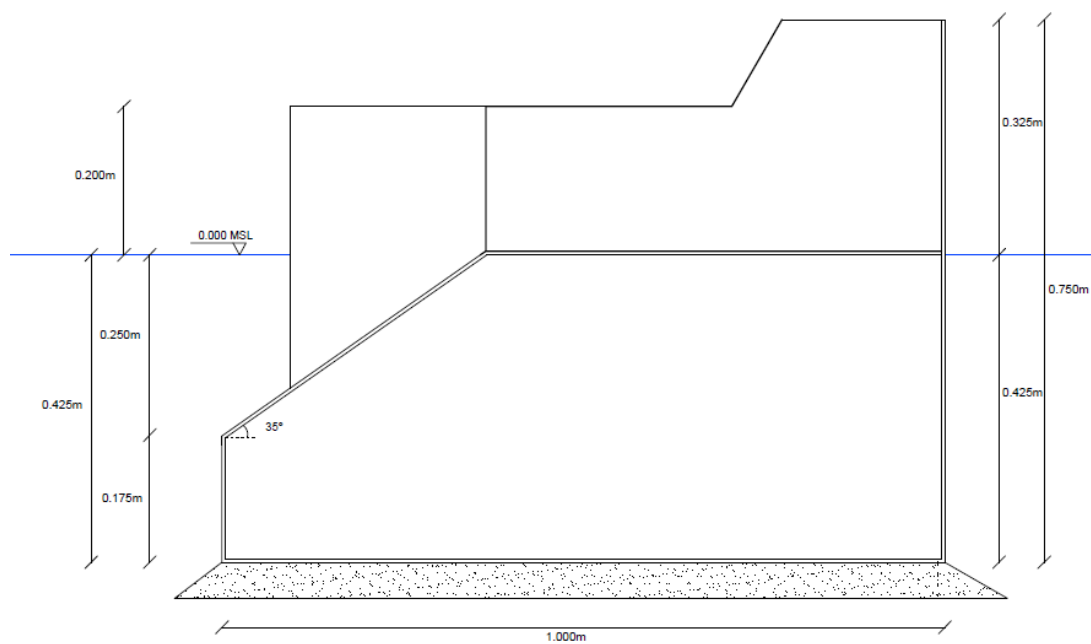


Figura A6 – Vista lateral do modelo com concentradores a 30° e configuração C2.

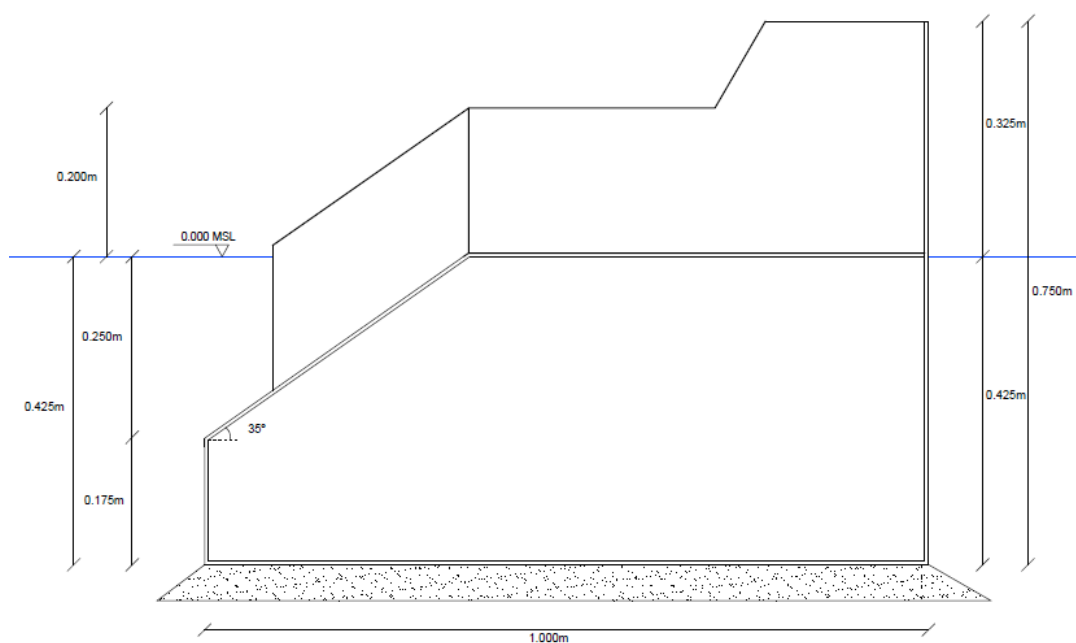


Figura A7 – Vista lateral d modelo com concentradores a 30° e configuração C3.

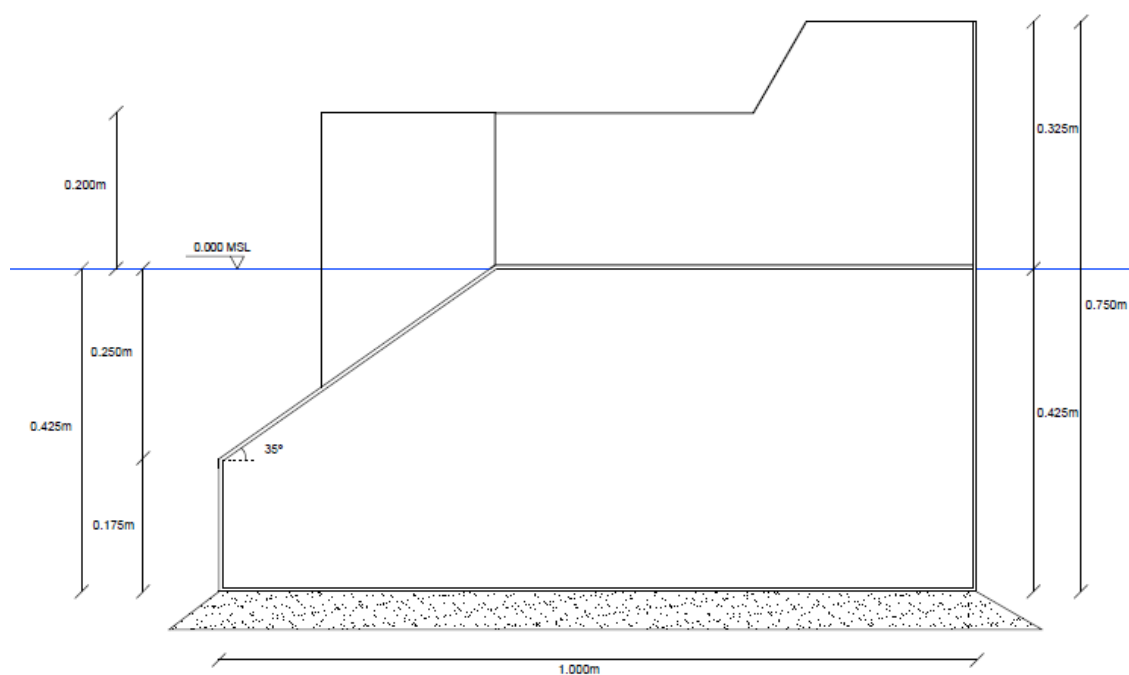


Figura A8 – Vista lateral do modelo com concentradores a 40° e configuração C2.

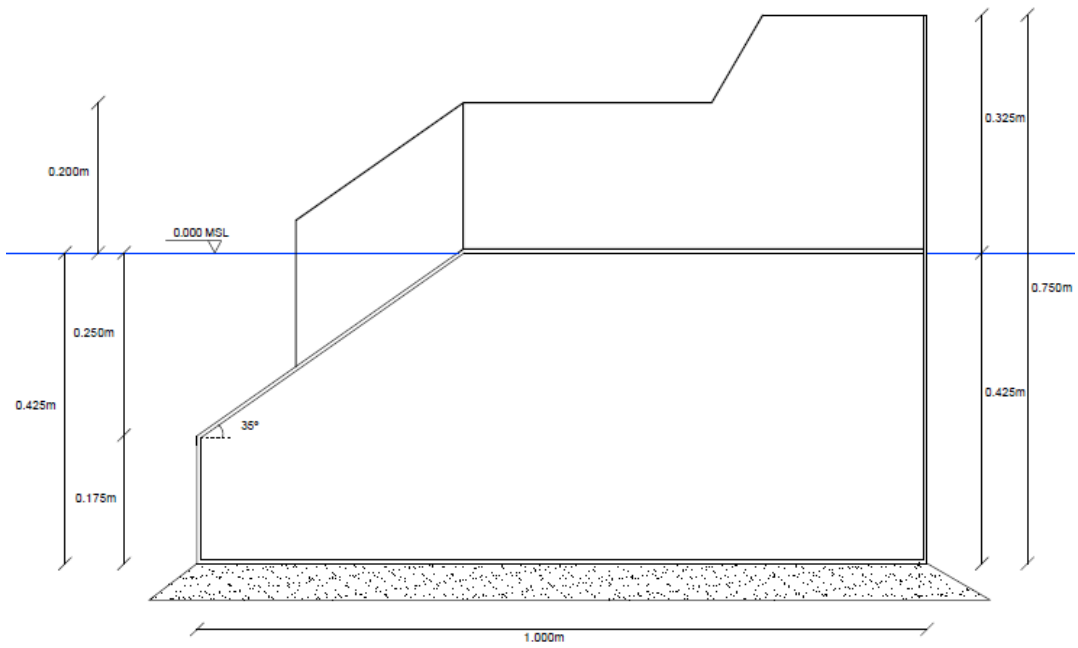


Figura A9 – Vista lateral do modelo com concentradores a 40° e configuração C3.

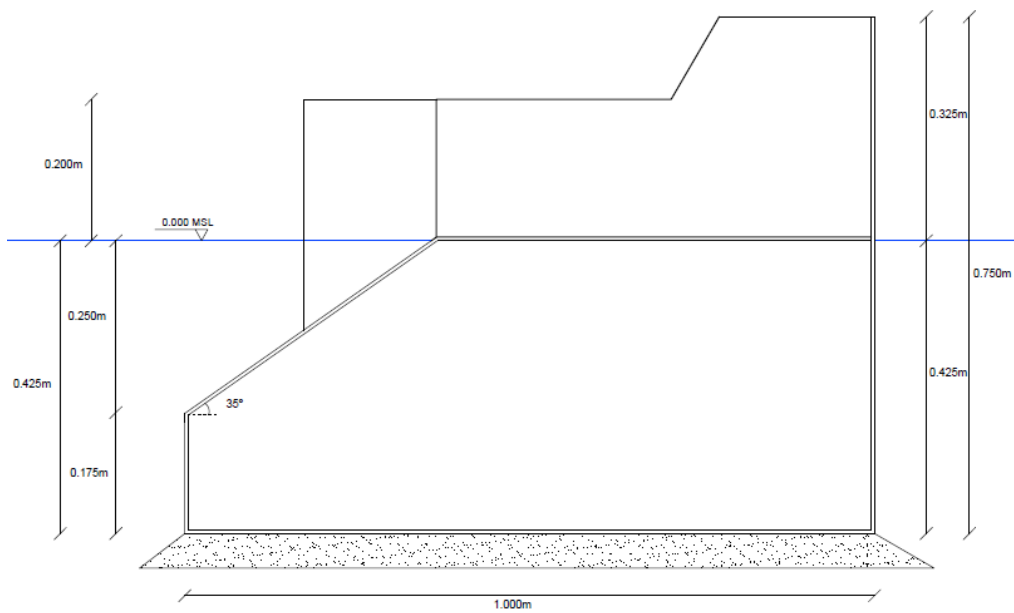


Figura A10 – Vista lateral do modelo com concentradores a 50° e configuração C2.

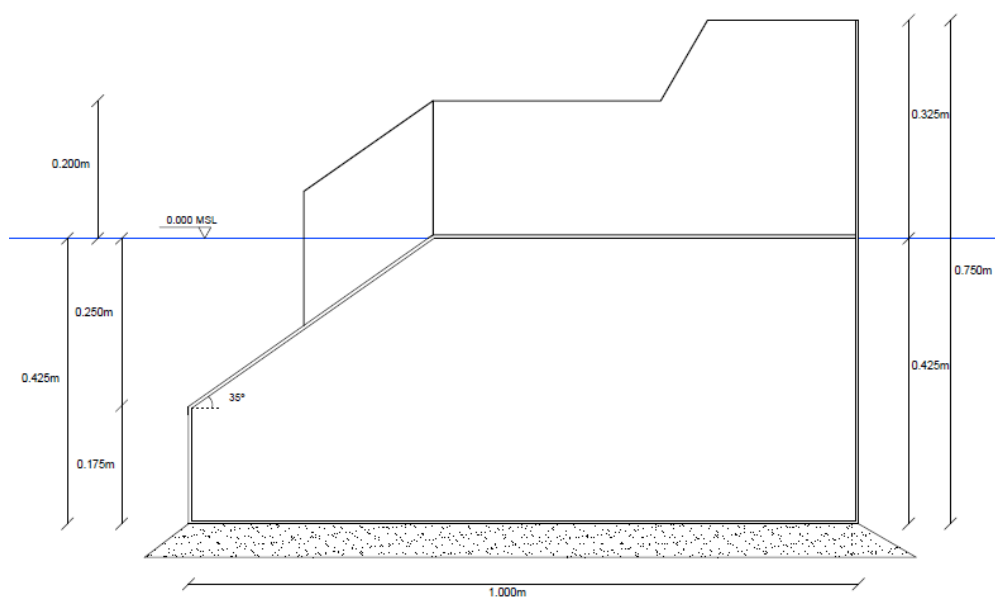


Figura A11 – Vista lateral do modelo com concentradores a 50° e configuração C3.

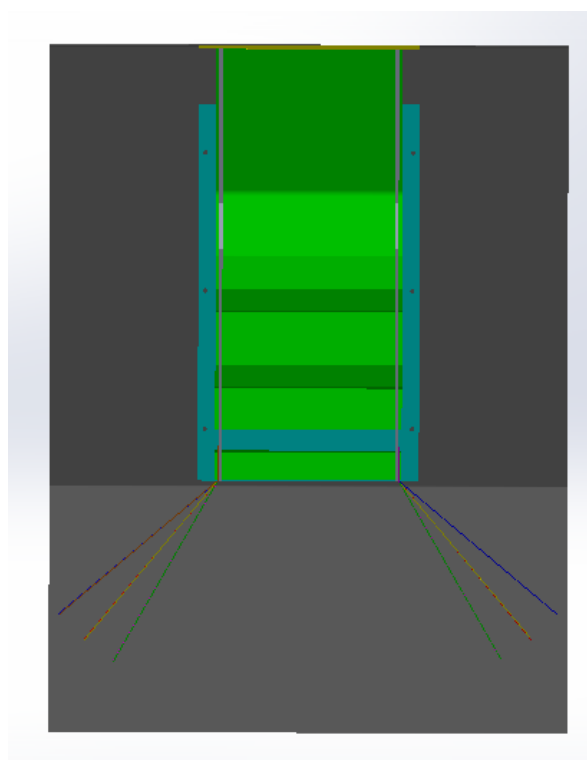


Figura A12 – Vista em planta do projeto realizado no *software* SolidWorks.

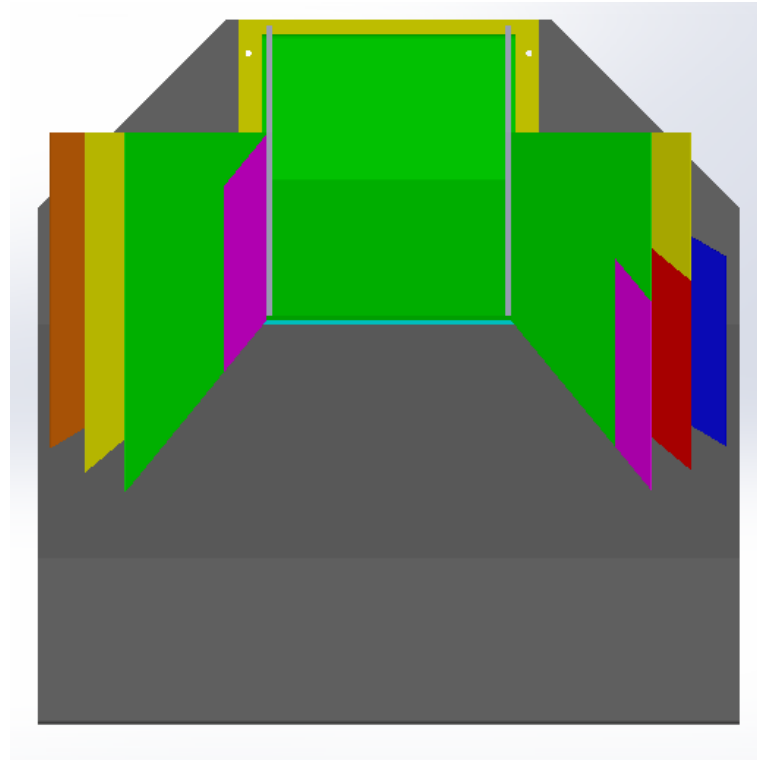


Figura A13 – Vista de frente do projeto realizado no *software* SolidWorks.

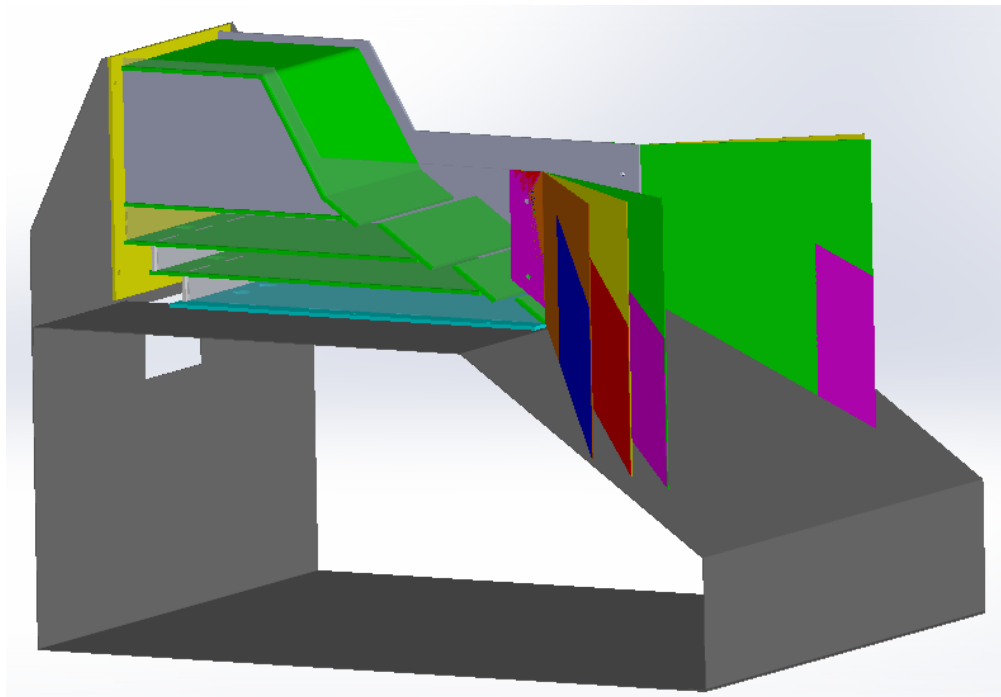


Figura A14 – Vista lateral (com a parede lateral transparente) do projeto realizado no *software* SolidWorks.

ANEXO B: INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL



Figura B1 – Estrutura ensaiada vista da janela de visualização.



Figura B2 – Reservatórios auxiliares vistos da janela de visualização.



Figura B3 – Mangueiras de ligação entre a estrutura SSG e os reservatórios auxiliares.



Figura B4 – Reservatórios auxiliares e instalações adjacentes.



Figura B5 – Instalação de cada uma das tampas dos reservatórios auxiliares.



Figura B6 – Frente da estrutura ensaiada no interior do canal.

ANEXO C: DADOS RECOLHIDOS EXPERIMENTALMENTE

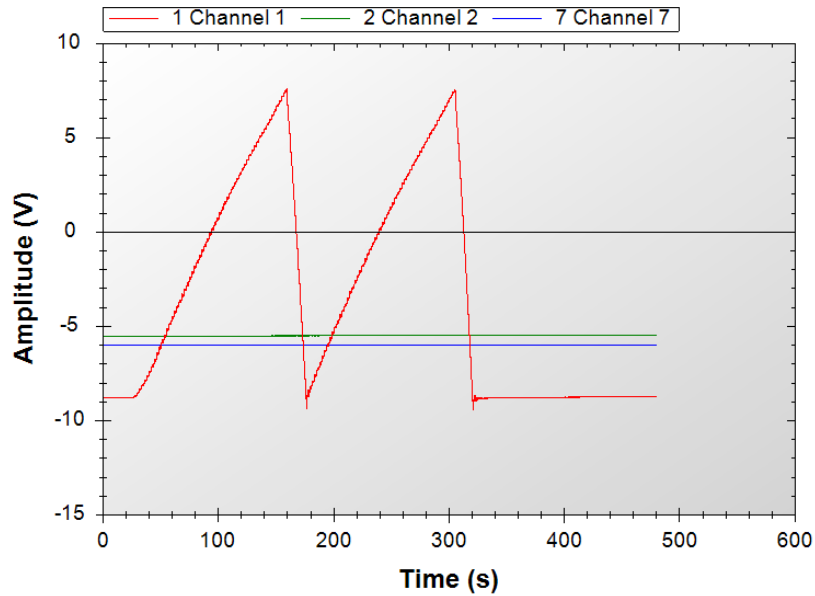


Figura C1 - Série temporal do nível de água nos três reservatórios (traduzido em V) para o ensaio 50C3_R3 ($H=1\text{m}$, $T=13.8\text{s}$ em dimensões do protótipo). Channel1 \equiv Reservatório1, Channel2 \equiv Reservatório2 e Channel7 \equiv Reservatório3.

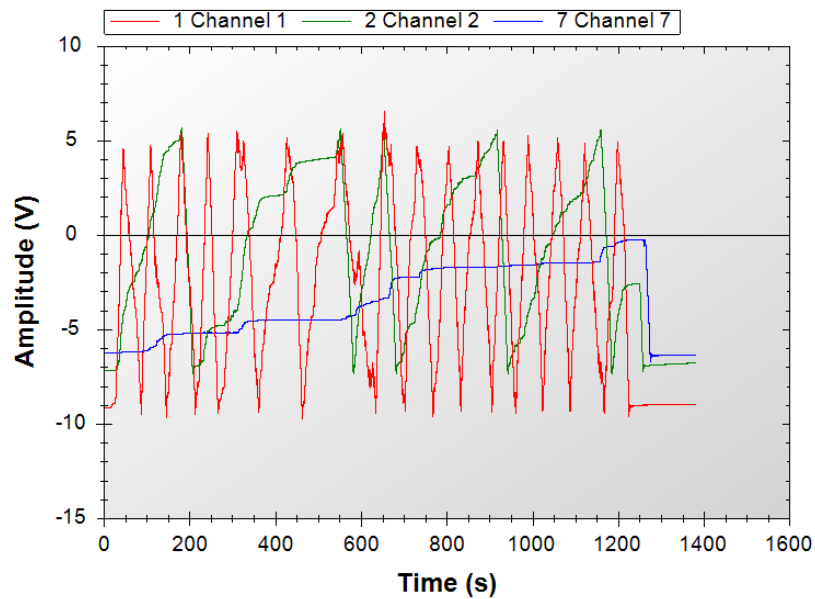


Figura C2 - Série temporal do nível de água nos três reservatórios (traduzido em V) para o ensaio 40C3_I4 ($H=0.75\text{m}$, $T=9.2\text{s}$ em dimensões do protótipo). Channel1 \equiv Reservatório1, Channel2 \equiv Reservatório2 e Channel7 \equiv Reservatório3.

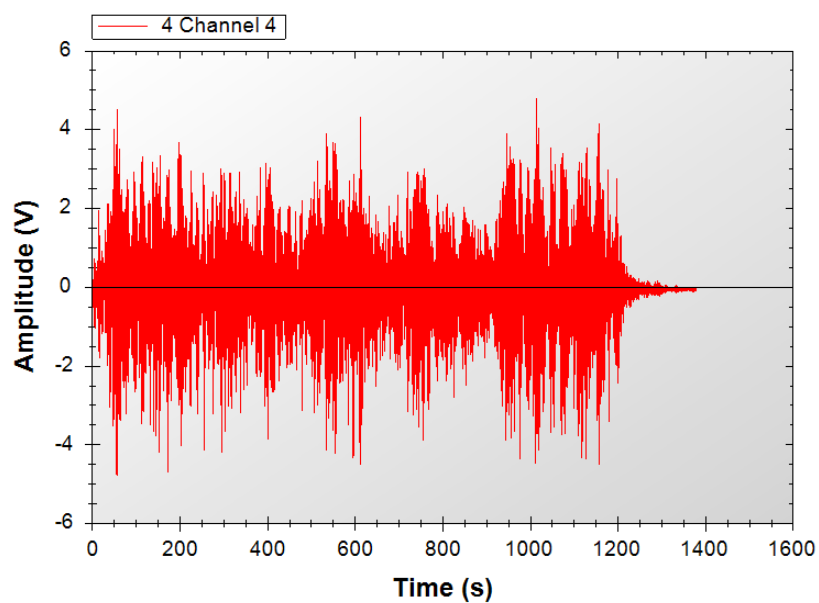


Figura C3 - Série temporal do nível de água da sonda S8 (traduzido em Volts) para o ensaio 30C3_II3 (H=2.75m, T=16.1s em dimensões do protótipo). Channel4=S8.

ANEXO D: TRATAMENTO DE DADOS DOS ENSAIOS PRELIMINARES

						Rc1	Rc2	Rc3			
						1.5	3	5			
ID	H(m) Hs(m)	T(s) Tp(s)	q1(m ³ /s)	q2(m ³ /s)	q3(m ³ /s)	P1(kW)	P2(kW)	P3(kW)	Ptotal(kW)	Pwave(kW/m)	Eff. (ηHyd)
0C1_IR1	2.5	11.5	3.609	1.788	0.506	54.44	53.93	25.44	133.80	61.36	22%
0C1_IR2	5.0	18.4	3.221	2.024	1.973	48.59	61.05	99.21	208.85	392.68	5%
0C1_II1	1.8	11.5	0.443	0.025	0.004	6.68	0.76	0.21	7.65	15.90	5%
0C1_II2	3.3	11.5	2.256	0.729	0.143	34.02	22.00	7.21	63.23	53.45	12%
0C1_II3	3.0	16.1	1.598	0.426	0.055	24.10	12.85	2.76	39.70	61.85	6%
0C1_II4	4.4	18.4	2.285	0.982	0.540	34.47	29.64	27.13	91.24	152.05	6%

Figura D1 – Dados dos ensaios preliminares para a combinação 0C1.

						Rc1	Rc2	Rc3			
						1.5	3	5			
ID	H(m) Hs(m)	T(s) Tp(s)	q1(m ³ /s)	q2(m ³ /s)	q3(m ³ /s)	P1(kW)	P2(kW)	P3(kW)	Ptotal(kW)	Pwave(kW/m)	Eff. (ηHyd)
30C2_IR1	2.5	11.5	3.626	2.074	1.568	54.69	62.58	78.86	196.13	77.85	12%
30C2_IR2	5.0	18.4	4.587	2.800	3.002	69.19	84.45	150.93	304.58	366.24	4%
30C2_II1	1.8	11.5	1.341	0.160	0.013	20.22	4.83	0.64	25.69	15.90	7%
30C2_II2	3.3	11.5	3.213	1.096	0.346	48.46	33.07	17.38	98.91	53.45	9%
30C2_II3	3.0	16.1	2.003	0.599	0.148	30.21	18.06	7.42	55.69	61.85	4%
30C2_II4	4.4	18.4	2.926	1.303	0.839	44.13	39.30	42.18	125.62	152.05	4%

Figura D2 –Dados dos ensaios preliminares para a combinação 30C2.

						Rc1	Rc2	Rc3			
						1.5	3	5			
ID	H(m) Hs(m)	T(s) Tp(s)	q1(m ³ /s)	q2(m ³ /s)	q3(m ³ /s)	P1(kW)	P2(kW)	P3(kW)	Ptotal(kW)	Pwave(kW/m)	Eff. (ηHyd)
30C3_IR1	2.5	11.5	3.761	2.058	1.720	56.73	62.07	86.49	205.28	61.36	15%
30C3_IR2	5.0	18.4	4.604	2.817	3.036	69.45	84.96	152.63	307.04	392.68	4%
30C3_II1	1.8	11.5	1.337	0.156	0.004	20.16	4.71	0.21	25.08	15.90	7%
30C3_II2	3.3	11.5	3.166	1.088	0.350	47.76	32.82	17.59	98.17	53.45	9%
30C3_II3	3.0	16.1	1.994	0.603	0.139	30.08	18.19	7.00	55.26	61.85	4%
30C3_II4	4.4	18.4	2.939	1.320	0.847	44.33	39.81	42.61	126.74	152.05	4%

Figura D3 – Dados dos ensaios preliminares para a combinação 30C3.

						Rc1	Rc2	Rc3			
						1.5	3	5			
ID	H(m) Hs(m)	T(s) Tp(s)	q1(m ³ /s)	q2(m ³ /s)	q3(m ³ /s)	P1(kW)	P2(kW)	P3(kW)	Ptotal(kW)	Pwave(kW/m)	Eff. (ηHyd)
40C2_IR1	2.5	11.5	3.963	2.058	1.720	59.78	62.07	86.49	208.34	61.36	14%
40C2_IR2	5.0	18.4	4.638	2.715	3.036	69.95	81.91	152.63	304.49	392.68	3%
40C2_II1	1.8	11.5	1.459	0.181	0.013	22.00	5.47	0.64	28.11	15.90	7%
40C2_II2	3.3	11.5	3.424	1.202	0.413	51.64	36.25	20.77	108.66	53.45	8%
40C2_II3	3.0	16.1	2.117	0.641	0.160	31.92	19.33	8.06	59.31	61.85	4%
40C2_II4	4.4	18.4	3.036	1.375	0.751	45.79	41.46	37.73	124.99	152.05	3%

Figura D4 – Dados dos ensaios preliminares para a combinação 40C2.

						Rc1	Rc2	Rc3			
						1.5	3	5			
ID	H(m) Hs(m)	T(s) Tp(s)	q1(m ³ /s)	q2(m ³ /s)	q3(m ³ /s)	P1(kW)	P2(kW)	P3(kW)	Ptotal(kW)	Pwave(kW/m)	Eff. (ηHyd)
40C3_IR1	2.5	11.5	3.879	2.007	1.636	58.51	60.54	82.25	201.30	61.36	13%
40C3_IR2	5.0	18.4	4.469	2.631	2.985	67.41	79.37	150.08	296.86	392.68	3%
40C3_II1	1.8	11.5	1.446	0.169	0.008	21.81	5.09	0.42	27.32	15.90	7%
40C3_II2	3.3	11.5	3.398	1.176	0.417	51.26	35.49	20.99	107.73	53.45	8%
40C3_II3	3.0	16.1	1.944	0.637	0.164	29.32	19.21	8.27	56.79	61.85	4%
40C3_II4	4.4	18.4	2.989	1.345	0.890	45.09	40.57	44.73	130.39	152.05	3%

Figura D5 – Dados dos ensaios preliminares para a combinação 40C3.

						Rc1	Rc2	Rc3			
						1.5	3	5			
ID	H(m) Hs(m)	T(s) Tp(s)	q1(m ³ /s)	q2(m ³ /s)	q3(m ³ /s)	P1(kW)	P2(kW)	P3(kW)	Ptotal(kW)	Pwave(kW/m)	Eff. (ηHyd)
50C2_IR1	2.5	11.5	4.402	2.108	1.990	66.39	63.59	100.06	230.04	61.36	13%
50C2_IR2	5.0	18.4	4.469	2.766	2.951	67.41	83.44	148.39	299.24	392.68	3%
50C2_II1	1.8	11.5	1.400	0.160	0.008	21.11	4.83	0.42	26.37	15.90	6%
50C2_II2	3.3	11.5	3.483	1.214	0.417	52.53	36.63	20.99	110.15	53.45	7%
50C2_II3	3.0	16.1	2.146	0.654	0.169	32.37	19.71	8.48	60.56	61.85	3%
50C2_II4	4.4	18.4	3.057	1.366	0.911	46.11	41.21	45.79	133.10	152.05	3%

Figura D6 – Dados dos ensaios preliminares para a combinação 50C2.

						Rc1	Rc2	Rc3			
						1.5	3	5			
ID	H(m) Hs(m)	T(s) Tp(s)	q1(m ³ /s)	q2(m ³ /s)	q3(m ³ /s)	P1(kW)	P2(kW)	P3(kW)	Ptotal(kW)	Pwave(kW/m)	Eff. (ηHyd)
50C3_IR1	2.5	11.5	4.571	2.041	2.074	68.94	61.56	104.30	234.79	61.36	14%
50C3_IR2	5.0	18.4	4.520	2.850	3.019	68.17	85.98	151.78	305.93	392.68	3%
50C3_II1	1.8	11.5	1.370	0.160	0.004	20.67	4.83	0.21	25.71	15.90	6%
50C3_II2	3.3	11.5	3.462	1.202	0.413	52.21	36.25	20.77	109.23	53.45	7%
50C3_II3	3.0	16.1	2.171	0.670	0.181	32.75	20.22	9.12	62.09	61.85	4%
50C3_II4	4.4	18.4	3.099	1.375	0.928	46.74	41.46	46.64	134.84	152.05	3%

Figura D7 – Dados dos ensaios preliminares para a combinação 50C3.

ANEXO E: TRATAMENTO DE DADOS DOS ENSAIOS COM ONDAS REGULARES

							Rc1	Rc2	Rc3			
							1.5	3	5			
ID	ID	H(m)	T(s)	q1(m ³ /s)	q2(m ³ /s)	q3(m ³ /s)	P1(kW)	P2(kW)	P3(kW)	Ptotal(kW)	Pwave(kW/m)	Eff. (ηHyd)
0C1_R1	R1	1.0	9.2	1.063	0.000	0.000	16.03	0.00	0.00	16.03	10.72	15%
0C1_R2	R2	1.0	11.5	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	12.46	0%
0C1_R3	R3	1.2	13.8	0.725	0.000	0.000	10.94	0.00	0.00	10.94	19.46	6%
0C1_R4	R4	2.2	9.2	4.975	1.029	0.000	75.04	31.03	0.00	106.08	51.90	20%
0C1_R5	R5	2.2	11.5	3.913	0.067	0.000	59.02	2.04	0.00	61.05	60.29	10%
0C1_R6	R6	2.5	13.8	3.879	1.450	0.000	58.51	43.75	0.00	102.26	84.47	12%
0C1_R7	R7	3.3	9.2	5.954	4.183	0.944	89.80	126.17	47.48	263.45	116.77	23%
0C1_R8	R8	3.3	11.5	5.195	2.530	0.320	78.35	76.31	16.11	170.77	135.65	13%
0C1_R9	R9	3.6	13.8	5.245	1.788	2.176	79.11	53.93	109.38	242.42	175.16	14%

Figura E1 – Dados dos ensaios com ondas regulares para a combinação 0C1.

							Rc1	Rc2	Rc3			
							1.5	3	5			
ID	ID	H(m)	T(s)	q1(m ³ /s)	q2(m ³ /s)	q3(m ³ /s)	P1(kW)	P2(kW)	P3(kW)	Ptotal(kW)	Pwave(kW/m)	Eff. (ηHyd)
30C3_R1	R1	1.0	9.2	1.906	0.000	0.000	28.74	0.00	0.00	28.74	10.72	12%
30C3_R2	R2	1.0	11.5	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	12.46	0%
30C3_R3	R3	1.2	13.8	0.169	0.000	0.000	2.54	0.00	0.00	2.54	19.46	1%
30C3_R4	R4	2.2	9.2	5.582	3.677	0.118	84.20	110.91	5.94	201.04	51.90	18%
30C3_R5	R5	2.2	11.5	4.587	0.084	0.000	69.19	2.54	0.00	71.74	60.29	6%
30C3_R6	R6	2.5	13.8	4.149	0.759	0.000	62.58	22.89	0.00	85.47	84.47	5%
30C3_R7	R7	3.3	9.2	6.072	4.958	4.014	91.58	149.58	201.81	442.96	116.77	18%
30C3_R8	R8	3.3	11.5	5.582	2.715	0.354	84.20	81.91	17.81	183.92	135.65	6%
30C3_R9	R9	3.6	13.8	5.380	1.906	2.395	81.15	57.49	120.41	259.04	175.16	7%

Figura E2 – Dados dos ensaios com ondas regulares para a combinação 30C3.

							Rc1	Rc2	Rc3			
							1.5	3	5			
ID	ID	H(m)	T(s)	q1(m ³ /s)	q2(m ³ /s)	q3(m ³ /s)	P1(kW)	P2(kW)	P3(kW)	Ptotal(kW)	Pwave(kW/m)	Eff. (ηHyd)
40C3_R1	R1	1.0	9.2	2.024	0.000	0.000	30.53	0.00	0.00	30.53	10.72	11%
40C3_R2	R2	1.0	11.5	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	12.46	0%
40C3_R3	R3	1.2	13.8	0.439	0.000	0.000	6.61	0.00	0.00	6.61	19.46	1%
40C3_R4	R4	2.2	9.2	5.751	3.710	0.287	86.74	111.93	14.41	213.09	51.90	16%
40C3_R5	R5	2.2	11.5	4.385	0.270	0.000	66.14	8.14	0.00	74.28	60.29	5%
40C3_R6	R6	2.5	13.8	3.828	1.552	0.051	57.74	46.81	2.54	107.09	84.47	5%
40C3_R7	R7	3.3	9.2	6.156	4.891	4.604	92.85	147.54	231.49	471.87	116.77	16%
40C3_R8	R8	3.3	11.5	5.532	2.935	0.708	83.44	88.52	35.61	207.57	135.65	6%
40C3_R9	R9	3.6	13.8	5.414	1.973	3.390	81.66	59.52	170.43	311.62	175.16	7%

Figura E3 – Dados dos ensaios com ondas regulares para a combinação 40C3.

							Rc1	Rc2	Rc3			
							1.5	3	5			
ID	ID	H(m)	T(s)	q1(m ³ /s)	q2(m ³ /s)	q3(m ³ /s)	P1(kW)	P2(kW)	P3(kW)	Ptotal(kW)	Pwave(kW/m)	Eff. (ηHyd)
50C3_R1	R1	1.0	9.2	1.214	0.000	0.000	18.32	0.00	0.00	18.32	10.72	6%
50C3_R2	R2	1.0	11.5	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	12.46	0%
50C3_R3	R3	1.2	13.8	0.590	0.000	0.000	8.90	0.00	0.00	8.90	19.46	2%
50C3_R4	R4	2.2	9.2	5.734	3.947	0.000	86.49	119.05	0.00	205.54	51.90	14%
50C3_R5	R5	2.2	11.5	4.452	0.304	0.000	67.16	9.16	0.00	76.31	60.29	5%
50C3_R6	R6	2.5	13.8	4.638	1.771	0.152	69.95	53.42	7.63	131.01	84.47	6%
50C3_R7	R7	3.3	9.2	6.190	5.127	4.824	93.36	154.66	242.51	490.53	116.77	15%
50C3_R8	R8	3.3	11.5	5.498	2.935	0.944	82.93	88.52	47.48	218.94	135.65	6%
50C3_R9	R9	3.6	13.8	6.156	4.975	4.655	92.85	150.08	234.03	476.96	175.16	10%

Figura E4 – Dados dos ensaios com ondas regulares para a combinação 50C3.

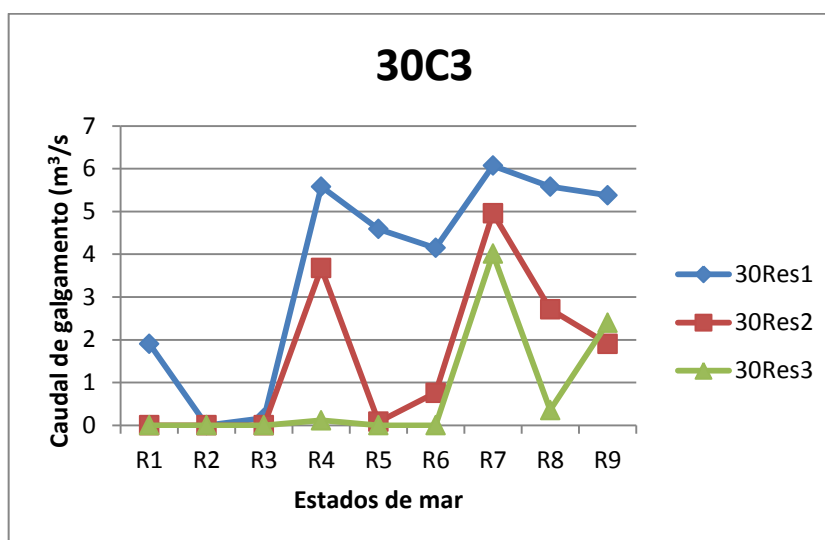


Figura E5 – Caudais de galgamento dos 3 reservatórios para os 9 estados de mar ensaiados, na combinação 30C3.

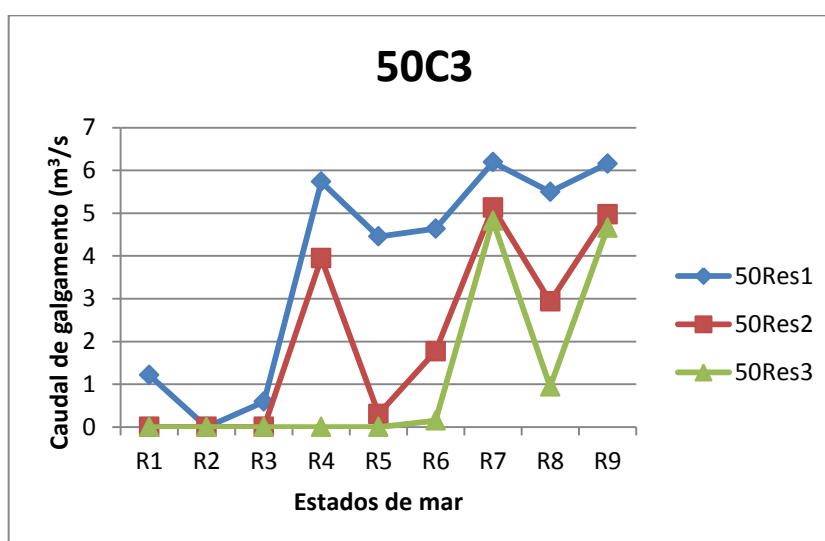


Figura E6 – Caudais de galgamento dos 3 reservatórios para os 9 estados de mar ensaiados, na combinação 50C3.

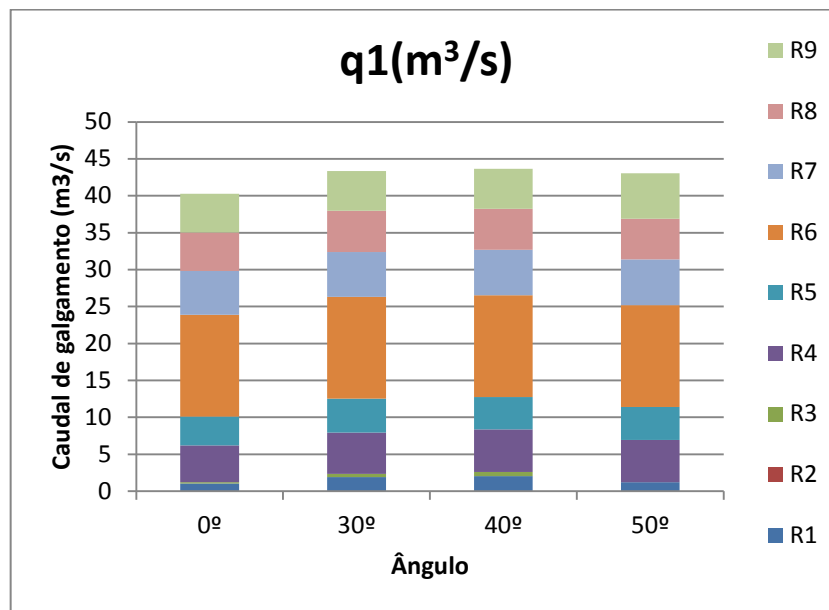


Figura E7 – Somatório dos caudais de galgamento do Reservatório 1 para os 9 estados de mar ensaiados, considerando as 4 combinações ensaiadas.

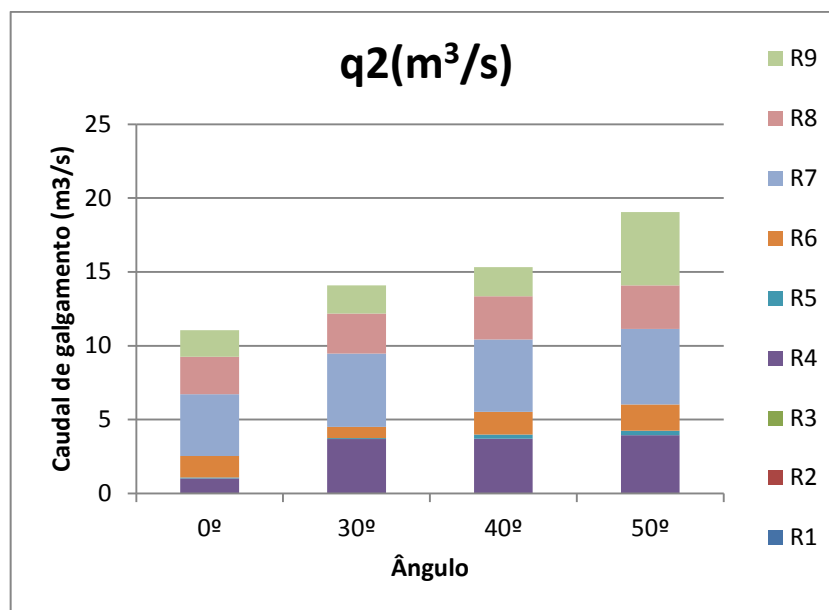


Figura E8 – Somatório dos caudais de galgamento do Reservatório 2 para os 9 estados de mar ensaiados, considerando as 4 combinações ensaiadas.

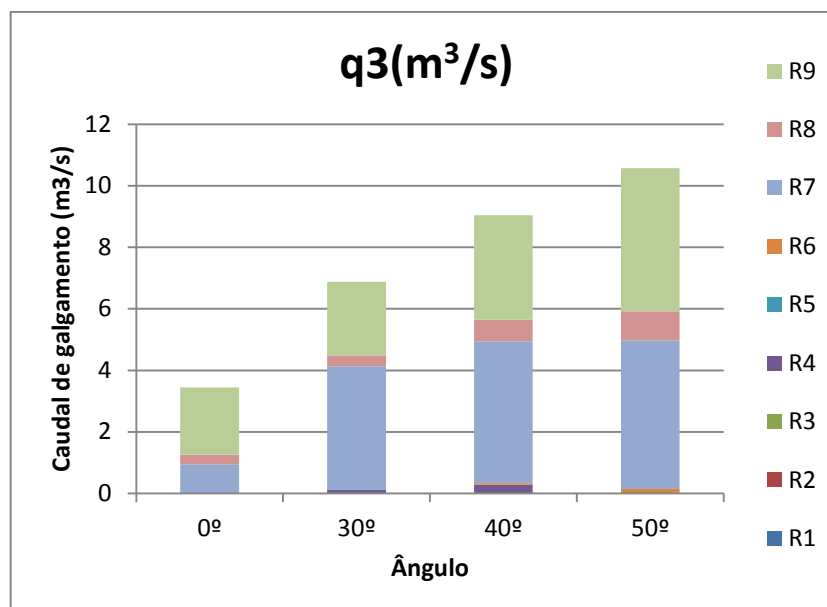


Figura E9 – Somatório dos caudais de galgamento do Reservatório 3 para os 9 estados de mar ensaiados, considerando as 4 combinações ensaiadas.

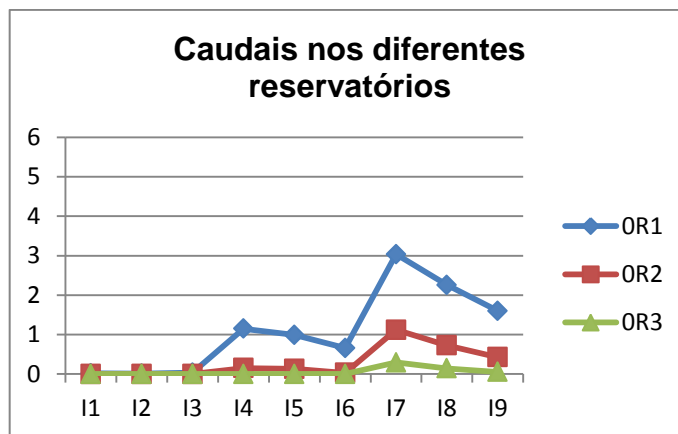


Figura F5 – Caudais de galgamento dos 3 reservatórios para os 9 estados de mar ensaiados, na combinação 0C1.

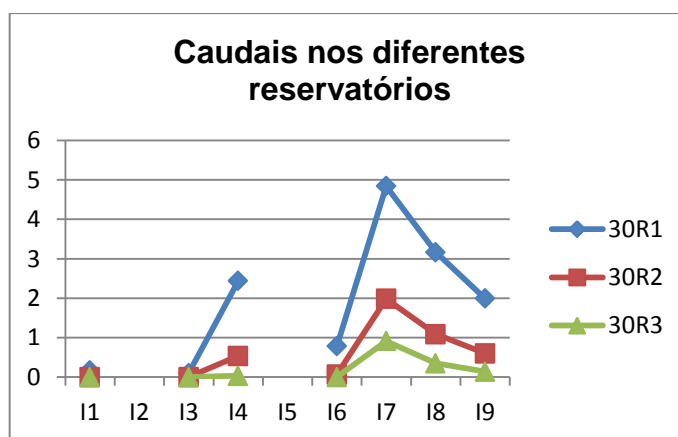


Figura F6 – Caudais de galgamento dos 3 reservatórios para os 9 estados de mar ensaiados, na combinação 30C3.

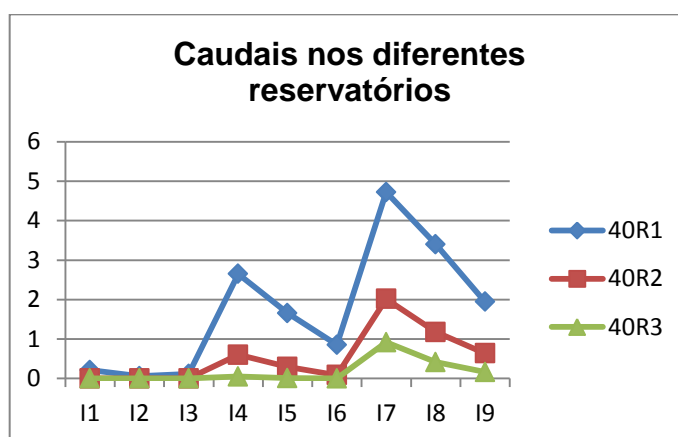


Figura F7 – Caudais de galgamento dos 3 reservatórios para os 9 estados de mar ensaiados, na combinação 40C3.

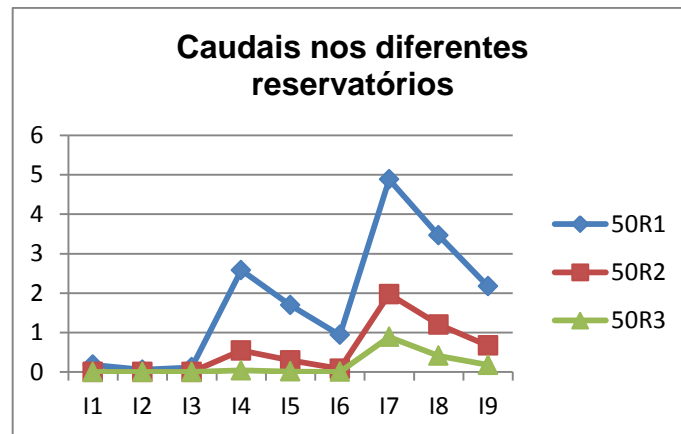


Figura F8 – Caudais de galgamento dos 3 reservatórios para os 9 estados de mar ensaiados, na combinação 50C3.

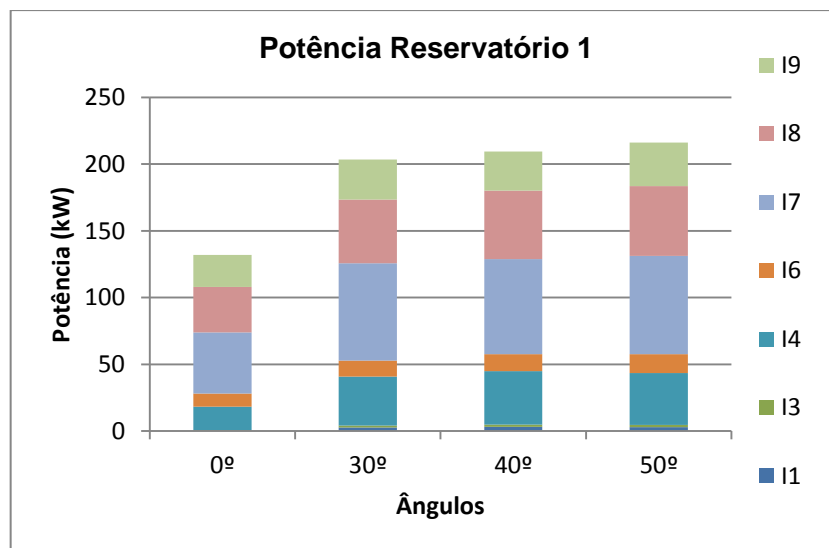


Figura F9 – Somatório das potências à entrada dos reservatórios do Reservatório 1 para os 9 estados de mar ensaiados, considerando as 4 combinações ensaiadas.

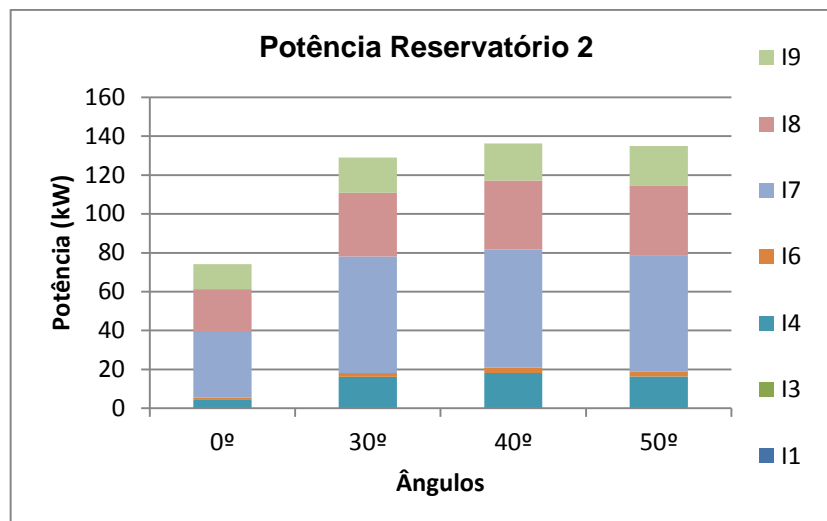


Figura F10 - Somatório das potências à entrada do dos reservatórios do Reservatório 2 para os 9 estados de mar ensaiados, considerando as 4 combinações ensaiadas.

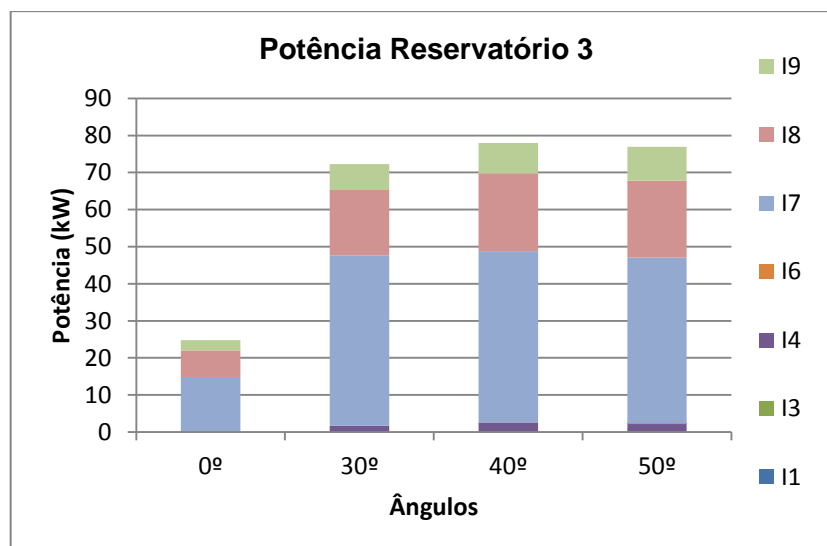


Figura F10 - Somatório das potências à entrada do dos reservatórios do Reservatório 3 para os 9 estados de mar ensaiados, considerando as 4 combinações ensaiadas.